

VŠB – Technická univerzita Ostrava  
Fakulta strojní  
Katedra mechanické technologie

**Hodnocení vybraných vlastností žárových nástřiků HVOF**  
**On an Evaluation of Selected Properties of HVOF Thermally  
Sprayed Coatings**

Student:  
Vedoucí bakalářské práce:

Jakub Drastík  
Ing. Vladislav Ochodek

Ostrava 2011

## Zadání bakalářské práce

Student: **Jakub Drastík**  
Studijní program: B2341 Strojírenství  
Studijní obor: 2303R002 Strojírenská technologie  
Specializace: 70 Strojírenská technologie  
Téma: **Hodnocení vybraných vlastností žárových nástřiků HVOF**  
**On an Evaluation of Selected Properties of HVOF Thermally Sprayed Coatings**

Zásady pro vypracování:

1. Provedte studii technologii žárových nástřiků se zaměřením na HVOF.
2. Provedte rozbor používaných přídavných materiálů a jejich vlastnosti pro vysokorychlostní nástřik plamenem.
3. Navrhněte a realizujte experimentální program ověření užitečných vlastností HVOF nástřiků na bázi WC-Co.
4. Dosažené výsledky porovnejte s literárními prameny a proveďte diskuzi.

Seznam doporučené odborné literatury:


ASM. Handbook vol. 6, *Welding, Brazing, Soldering*. ASM 2001.  
ASM. *Handbook of Thermal Spray Technology*. ASM 2004.

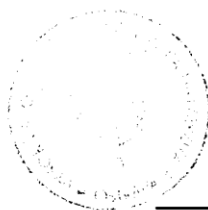
Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.


Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Vladislav Ochodek**

Datum zadání: 17.12.2010

Datum odevzdání: 23.05.2011

  
\_\_\_\_\_  
prof. Ing. Jiří Hrubý, CSc.  
vedoucí katedry



  
\_\_\_\_\_  
prof. Ing. Radim Farana, CSc.  
děkan fakulty

## ANOTACE BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Drastík, Jakub. Hodnocení vybraných vlastností žárových nástřiků HVOF  
Ostrava: Katedra mechanické technologie, Fakulta strojní VŠB-Technická univerzita  
Ostrava, 2011, 33 s. bakalářské práce, vedoucí ing. Vladislav Ochodek.

Bakalářská práce se zabývá hodnocením vlastností žárových nástřiků HVOF. Úvodem je popsána historie žárových nástřiků. Dále se zabývá obecně žárovými nástřiky a přes rozdělení technologii (např.: žárový nástřik plamenem) se došla až ke HVOF nástřiku. U každé technologie je popsán charakter, přídavný materiál, vlastnosti a obecně popsána technologie. U druhého bodu jsou probrány přídavné materiály, které se používají při žárových nástřicích. K materiálům jsou přiřazeny jejich chemické, mechanické a fyzikální vlastnosti. Dále k tomuto bodu byly vypracovány vlastnosti daných povlaků. Experimentální část je znázornění vzorků, které byly popsány a zhodnoceny. Vzorky byly žárovým nástřikem povlakovány. Dále pak byly vloženy do media (na 24 hodin, na týden a na celý jeden měsíc). Vzorky byly nadále rozřízlé, vybroušené a leštěné. Po těchto úpravách byly vzorky prohlédnuté přes mikroskop a zhotovily se fotografie. Nakonec bylo vše prokonzultováno a vyhotoven závěr.

## BACHELOR OF WORK SUMMARY

Drastík, Jakub. Evaluation of selected characteristics of HVOF thermal spraying,  
Ostrava: Department of Mechanical Technology, Faculty of Mechanical Engineering VŠB-  
Technical University of Ostrava, 2011, 41 p. thesis, leading Mr. Vladislav Ochodek.

This thesis deals with the evaluation of the properties of HVOF thermal spraying. First, it describes the history of thermal spraying. It also deals with general spraying and dipping over the division of technology (eg incandescent flame spraying) is do up for HVOF spraying. Each technology is described in nature, additional material properties and generally described technology. In the second section discusses the additional materials that are used in the cremation injections. The materials are attributed to their chemical, mechanical and physical properties. Further to this point have been developed properties of the coatings. Is a representation of the experimental samples, which were described and evaluated. Samples were sprayed zinc coating. Then were inserted into the media (24 hours per week and one full month). Samples continued to be slit, cut and polished. After these adjustments were prohlédnuté samples through a microscope and made the pictures. Finally, everything was consulted and the conclusion drawn.

## Prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou bakalářskou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě: 23. 5. 2011

  
.....  
podpis studenta

Prohlašuji, že

- jsem byl seznámen s tím, že na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména § 35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 – školní dílo.
- беру на ве́доміі, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě bakalářskou práci užít (§ 35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že bakalářská práce bude v elektronické podobě uložena v Ústřední knihovně VŠB-TUO k nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího bakalářské práce. Souhlasím s tím, že údaje o kvalifikační práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo – bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- беру на ве́доміі, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě : 23.5.2011

  
.....  
podpis

Jméno a příjmení autora práce:

Jakub Drastík

Adresa trvalého pobytu autora práce:

Stiborská 51/3, Kobeřice 747 27

## **Obsah**

Úvod.....	7
1. Studie technologií žárových nástřiků: .....	8
1.1 Rozdělení žárových nástřiků: .....	8
1.2 Nástřik elektrickým obloukem: .....	9
1.3 Nástřik plamenem: .....	10
1.4 Detonační nástřik: .....	11
1.5 Plazmatický nástřik: .....	12
1.6 Nástřik HVOF: .....	15
2. Rozbor používaných přídavných materiálů:.....	19
3. Realizace experimentálního programu, ověření vlastností HVOF nástřiků WC - Co: .....	23
4. Diskuze dosažených výsledků:.....	39
5. Závěr: .....	40
Literatura:.....	41

## Úvod

Žárové nástřiky představují perspektivní technologii poskytující funkčně efektivní povlaky o tloušťce větší než 50 mikronu, používané v mnoha odvětvích průmyslu. Tyto flexibilní, vysoce kvalitní a ekonomické technologie umožňují optimálně přizpůsobit povrchové vlastnosti součásti provozním podmínkám. To vede k prodloužení životnosti, zvýšení spolehlivosti a bezpečnosti součásti daného procesu.

### **Druhy žárových nástřiků:**

- Žárový nástřik plamenem
- Žárový nástřik HVOF
- Žárový nástřik plazmou
- Žárový nástřik elektrickým obloukem
- Žárový nástřik výbuchem (detonační nástřik).

V řadě případů - automobilový průmysl, letecký průmysl, chemický a petrochemický průmysl, lékařství - jsou technologie žárově stříkaných povlaků nezastupitelné a sehrávají klíčovou roli při výrobě. Jejich praktický dopad na kvalitu výrobků spočívá v technickém a ekonomickém zvyšování užitečných vlastností jak v prvovýrobě, tak i v oblasti renovací:

- odolnost proti mechanickému opotřebení (abraze, eroze, kavitace)
- vynikající tribologické vlastnosti (samomazné, kluzné, těsnící povlaky)
- odolnost proti oxidaci, korozi a proti působení agresivního chemického prostředí
- odolnost proti extrémně vysokým teplotám
- doplnění rozměrů, doplnění chybějícího materiálu
- elektroizolační a elektrovedivé povlaky
- biokompatibilní, zdravotně nezávadné povlaky
- povlaky se speciálními fyzikálními vlastnostmi (supravodivost, optika, odolnost proti záření, iontově reagující povlaky)
- dekorativní povlaky.

# **1. Studie technologie žárových nástřiků**

Žárový nástřik je částicový proces, při kterém se vytvářejí povlaky o tloušťce větší než 50  $\mu\text{m}$ , materiál je nanášen ve formě prášků (případně drátu) přiváděn do zařízení, kde dojde k jeho natavení a urychlení směrem k povlakované součásti. Po dopadu na substrát dojde k výraznému plošnému rozprostření částice a k jejímu rychlému utuhnutí. Tím se vytváří povlak se specifickými vlastnostmi.

Zdrojem tepelné energie, nutné k nastavení přídavného materiálu, může být buď spalovací proces, nebo elektrická energie. Podle konstrukce zařízení a použitého zdroje energie lze rozlišit základní druhy žárového nástřiku: Nástřik plamenem, plazmatický nástřik a nástřik elektrickým obloukem.

Žárový nástřik není založen na depozici jednotlivých atomů či iontů. Na povrch dopadají celé natavené kapky materiálu, které ulpívají pouze na površích ležících v dráze letících kapek.

Doba setrvání částice v plameni a rychlost letících částic, jsou výsledkem působení rychlosti plamene. Vyšší rychlost plamene má za následek vyšší rychlost letící částice a její vyšší kinetickou energii při dopadu na substrát, což vede k větší plastické deformaci částice, jejímu lepšímu zakotvení a vyšší hustotě povlaku. Při kratší době částice strávené v plameni může dojít k menšímu protavení částice. Způsobí tím vyšší výskyt nedokonale protažených částic a nižší hustotu povlaků. [1,2]

## **1.1 Rozdělení žárových nástřiků**

Metody žárového nástřiku:

Rozdělení podle tepelného zdroje použitého k natavení nanášeného materiálu do dvou skupin:

a) Tepelná energie hoření směsi paliva a kyslíku:

- nástřik plamenem
- detonační nástřik - D-Gun
- vysokorychlostní nástřik plamenem - HVOF (Hight Velocity Oxygen Fuel)

b) Tepelná energie elektrického zdroje:

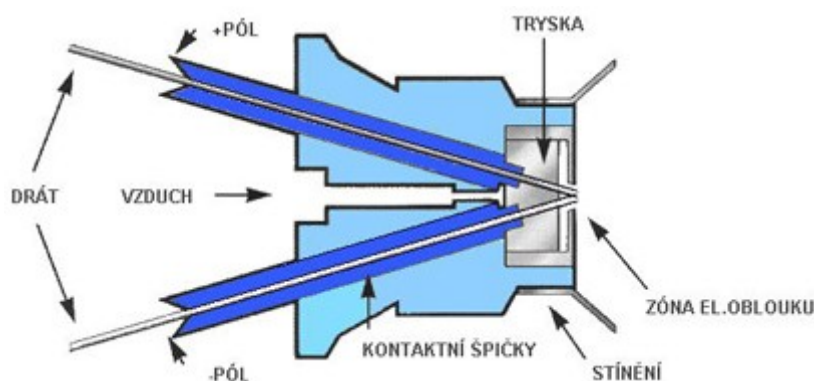
- plazmatický nástřik
  - APS (air plasma spraying)
  - VPS (vacuum plasma spraying), někdy označované LPPS (low pressure plasma spraying)
  - RFPS (radio-frequency plasma spraying)
- nástřik elektrickým obloukem



## 1.2. Nástřik elektrickým obloukem

U této metody se používá přídavný materiál ve formě dvou drátů, mezi jejich konci hoří elektrický oblouk. Tavenina, která tímto procesem vzniká, je rozprašována stlačeným vzduchem. Proud kapiček materiálu je nanášen na povlakovanou součást. Jednoduchost, nízké provozní náklady, mobilita (pro provoz je potřeba pouze stlačený vzduch a elektrická energie), vysoký výkon (až 80 kg materiálu za hodinu) a široké spektrum materiálů dostupných ve formě drátu jsou hlavní přednosti tohoto druhu žárového nástřiku. Na rozdíl od ostatních druhů žárových nástřiků je teplotní ovlivnění povlakované součásti způsobené pouze teplem přineseným na povrch roztavenými kapičkami kovu.[4]

Je nutné dbát na stabilitu zdroje elektrického proudu a plynulost podávání drátu. Kvalita povlaku v případě nástřiku elektrickým obloukem souvisí hlavně se stabilitou elektrického oblouku mezi konci drátů.[3]



Obr. 1. Schéma pro nástřik elektrickým obloukem.[3]

### ***Materiály:***

Pro nástřik elektrickým obloukem je nutné, aby materiál určený pro nástřik byl elektricky vodivý a zároveň tvárný natolik, aby jej bylo možno vyrábět ve formě drátu. Tyto požadavky omezují rozsah materiálů hlavně na kovy, ačkoli v současnosti vyvíjené tzv. trubičkové dráty umožňují i nástřik cermetů.[2]

Typickou aplikací nástřiků elektrickým obloukem jsou povlaky odolné proti korozi - na bázi hliníku, zinku, mědi či nerezové oceli:

- Na mostní konstrukce
- Nádoby pro uchování kapalin
- Komponenty námořních lodí.

Pro další zvýšení korozivzdornosti je možné zatěsnit otevřené povrchové póry impregnačním nátěrem na bázi epoxidových pryskyřic.

### ***Charakteristiky procesu:***

- Rychlost proudu plynu: 50-100 m/s
- Použité plyny: vzduch, N<sub>2</sub>, Ar
- Průtok plynu: 500-3000 slm
- Rychlost částic: 50-100 m/s
- Teplota částic: 3 800 °C
- Průtok prášku: 150-2000 g/min

### ***Vlastnosti a charakter povlaku:***

- Hustota: 80-95 %
- Adheze: 10-40 MPa
- Obsah oxidů: střední až vysoký

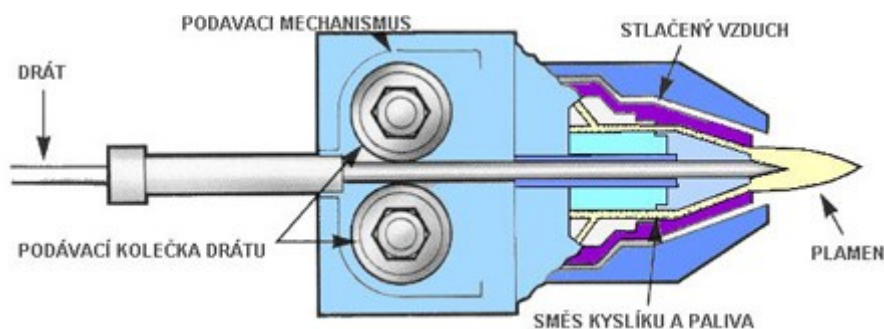
Vzhledem k tomu, že při nástřiku elektrickým obloukem je materiál rozprašován studeným proudem plynu, je možné nanášet povlak i na takové typy substrátu, u kterých nesmí dojít k tepelnému ovlivnění, tzn. např. na polymery, dřevo, sklo i kovy s nízkou teplotou tání. Ve srovnání s procesy používajícími materiál ve formě prášku jsou splaty tvořící strukturu elektrickým obloukem nastříkaného povlaku silnější a jejich velikost je nepravidelná. Nepravidelná velikost částic vede také k vysoké míře porezity i k vyšší drsnosti povrchu povlaku.[6]

## **1.3 Nástřik plamenem**

Nástřik plamenem je nejstarším způsobem žárového nástřiku. Tato metoda používá stlačený vzduch nebo kyslík společně s palivem (acetylen, propylen, propan, vodík). Nanášený materiál ve formě prášku nebo drátu je přiváděn do plamene, vzniklého hořením této směsi, kde dojde k jeho natavení a urychlení směrem k povlakované součásti. Obecně tento proces vytváří povlaky o nižší kvalitě, které nejsou využívány pro aplikace, u kterých je potřeba povlak s vysokou hustotou a přilnavostí. Hlavním důvodem těchto nedostatků je nízká dopadová rychlost částic a nízká teplota plamene. Na druhou stranu nízké pořizovací i provozní náklady favorizují tuto metodu pro méně náročné aplikace.[2]

### ***Charakteristiky procesu:***

- Rychlost plamene: 50-100 m/s
- Teplota plamene: 3 500 K
- Použité plyny: O<sub>2</sub>, acetylen
- Průtok plynu: 100-200 slm
- Rychlost částic: 50-80 m/s
- Teplota částic: 2 500 °C
- Průtok prášku: 30-50 g/min.



Obr. 2. Schéma zařízení pro nástřik plamenem. [3]

#### ***Výhody:***

- jednoduchost a operativnost zhotovování vrstvy
- široká škála samostatných prášků
- možnost vytvářet silné vrstvy přídavného materiálu o tloušťce několika mm
- možnost vytvářet velice tenké vrstvy přídavného materiálu od 0,2 mm
- možnost navařovat hrany, malé a členité předměty
- díky malým rozměrům hořáku lze provádět nástřik na hůře přístupných plochách
- vysoká soudržnost se základním materiálem
- nástřik není ovlivněn základním materiálem
- nenáročná příprava podkladu
- lze použít i pro nástřik plastových prášků.

#### ***Nevýhody:***

- bez použití polohovadla nevhodné pro větší plochy z důvodu rovnoměrnosti vrstvy
- vyšší prohřátí základního materiálu a tím vznik napětí a případné deformace.

### **1.4 Detonační nástřik**

Přídavný materiál ve formě prášků je přiváděn do uzavřené spalovací komory, kde dochází k využití tepelné a kinetické energie spalovacího procesu plynů. Ve srovnání s nástřikem plamenem dosahuje vyšších teplot i rychlostí dopadu. Poprvé byl tento princip použit firmou Union Carbide pod obchodním názvem D-Gun<sup>TM</sup>.

Při nástřiku jsou palivové plyny stlačovány ve spalovací komoře, do které je přiváděn materiál ve formě prášku. Vzniklá směs plynů a prášku je diskontinuálně zapalována zapalovací svíčkou. Vzniklá exploze plynů ohřívá a současně urychluje částice prášku hrdlem hořáku směrem k povlakované součásti. Poté je spalovací komora vypláchnuta proudem dusíku. Tento proces je cyklicky opakován s frekvencí více jak 100 cyklů za minutu.

### ***Charakteristiky procesu:***

- Rychlost plamene:  $> 1000 \text{ m/s}$
- Teplota plamene:  $5\,500 \text{ K}$
- Použité plyny:  $\text{O}_2$ , acetylen

### ***Materiály:***

Skladba materiálů, vhodných pro detonační nástřik je obdobná jako pro HVOF nástřik. Jedná se zejména o kovy a jejich slitiny, některé druhy cermetů atd.

### ***Charakter a vlastnosti povlaků:***

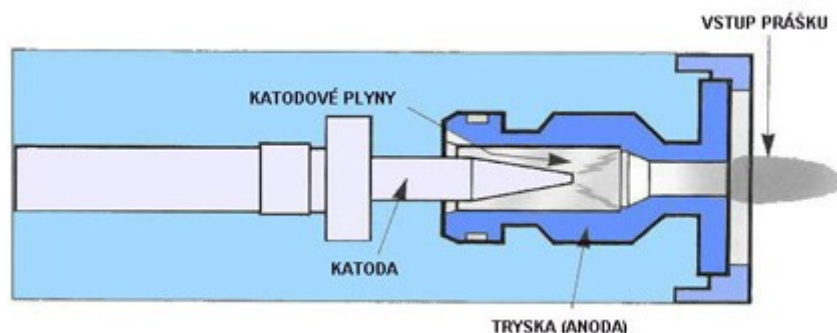
- Hustota:  $> 95\%$
- Adheze:  $82 \text{ MPa}$
- Obsah oxidů: nízký

Vyšší dosažená teplota a rychlost částic, spolu s redukcí oxidační atmosféry v uzavřené spalovací komoře, vede ve srovnání s nástřikem plamenem k lepší adhezi povlaku, k výraznějšímu rozptýlení částic, snížení porózy a obsahu oxidických částic ve struktuře. Během nástřiku dochází též k menší míře dekarbonizace materiálu povlaku, což má za následek jeho vysokou tvrdost.[4]

## **1.5. Plazmatický nástřik**

Při nástřiku plazmou hoří elektrický oblouk mezi vodou, která je chlazená wolframovou katodou a válcovou měděnou anodou, tvořící zároveň trysku plazmového hořáku. Elektrický oblouk hoří v plazmovém plynu (argon). Plazmový plyn je napouštěn axiálně do hořáku, na jehož druhém konci vystupuje plazma s vysokou teplotou (až  $20\,000 \text{ K}$ ) a entalpií. Pomocí nosného plynu se přivádí nanášený materiál ve formě prášku. Touto metodou je možné díky vysoké teplotě plazmatu nanášet všechny druhy materiálů od čistých kovů až po těžce tavitelné materiály (např. keramiky). Vysoká teplota plazmatu je v některých případech nevýhodou, protože může způsobit oxidaci, změnu fázového složení nebo vyhořívání některých prvků nanášeného materiálu v průběhu nástřiku. Vlastnosti takto vytvořeného povlaku se poté mohou výrazně lišit od předpokládaných. Pro dosažení extrémně vysoké hustoty, přilnavosti a čistoty povlaků je možné provádět plazmatický nástřik v uzavřené komoře za sníženého tlaku.

Konstrukce zařízení pro plazmatický nástřik se vzájemně liší tvarem a velikostí elektrody, materiály zařízení či způsobem chlazení. Různé konstrukce plazmových hořáků umožňují jak dosahovat různých rozsahů průtoku plynů a množství vnesené energie, tak i používat různé typy vstupu přídatného prášku do plazmového hořáku. Podmínky a geometrie vstupu prášku mají výrazný vliv na stupeň jeho protavení a tudíž i na kvalitu výsledného povlaku – hlavně na míru porózy a obsah oxidů ve struktuře.[3,4]



Obr. 3. Schéma nástřiku plasmou.[3]

### Charakteristiky procesu:

Konstrukční rozdíly v zařízení vedou k širokému rozsahu charakteristik procesu. V přehledu hlavních procesních parametrů jsou proto uvedeny údaje vztahující se ke třem základním typům plazmatického nástřiku: atmosférickému plazmatickému nástřiku (APS), vakuovému plazmatickému nástřiku (VPS) a nástřiku pomocí rádio frekvenčního plazmatu (RF plazma).

	APS	VPS	RF plazma
Rychlost plamene:	300-1000 m/s	200-600 m/s	20-80 m/s
Teplota plamene:	15 000 K	12 000 K	10 000 K
Použité plyny:	Ar, He, H <sub>2</sub> , N <sub>2</sub>	Ar, He, H <sub>2</sub>	Ar, He, H <sub>2</sub>
Průtok plynu:	100-200 slm	150-250 slm	75-150 slm
Rychlost částic:	200-800 m/s	200-600 m/s	20-50 m/s
Teplota částic:	> 3 800 °C	> 3 800 °C	> 3 800 °C
Průtok prášku:	50-150 g/min	25-150 g/min	20-50 g/min

Tabulka 1. Charakteristika plazmového nástřiku.[4]

Teplota a rychlost proudu plazmatu závisí zejména na konstrukci hořáku, energetickém příkonu a použitém plynu. Obvykle se při plazmatickém nástřiku používá argon s příměsí dalšího entalpii zvyšujícího plynu. Argon sám tvoří pouze nízkoenergetické plazma. Proto se používá ve směsi s heliem (20-50 objemových % He) nebo s vodíkem (5-15 objemových % H<sub>2</sub>). Jedním z nejteplejších plazmových plynů je dusík, avšak jeho použití je omezeno jeho vysokou reaktivností s většinou přídavných materiálů.

Výsledná rychlost jednotlivých částic prášku je dána rychlostí nosného plynu, tzn. kombinací průtoku nosného plynu a průměru přívodních trysek. Rychlost částice prášku spolu s její hmotností a úhlem, pod kterým vstupuje do proudu plazmatu, pak definuje výslednou trajektorii částice. Na obrázku je schematicky znázorněno rozložení možných trajektorií částic prášku v proudu plazmatu. Malé a lehké částice nemají naštěstí obvykle dostatečný moment hybnosti ( $m \times v$ ), aby pronikly do středové, nejteplejší části proudu plazmatu, kde by pravděpodobně došlo k jejich přehřátí a degradaci. Větší částice s vyšší hmotností, které pro správné natavení potřebují delší čas a vyšší teplotu, mají naopak dostatečnou energii k proniknutí do středu plazmového proudu. Na druhou stranu, příliš velká rychlost nosného plynu může vést k tomu, že zvláště velké nebo těžké částice (např. W nebo Mo) proniknou až

na druhou stranu proudu plazmatu do oblasti s nižšími teplotami, což může vést k nárůstu podílu špatně natavených částic ve struktuře povlaku a ke snížení depoziční účinnosti.

### ***Materiály:***

Vysoká teplota plazmatu umožňuje použití pro nástřik prakticky všechny materiály, které jsou stabilní až do teploty tavení. Technologie je vhodná pro nástřik kovů, většiny keramik a cermetů. Vysoká teplota však může být v některých případech nevýhodou, protože může způsobit oxidaci, změnu fázového složení nebo vyhořívání některých prvků nanášeného materiálu v průběhu nástřiku. [4]

### ***Charakter a vlastnosti povlaků:***

	APS	VPS	RF plasma
Hustota:	90-95 %	90-99 %	95-99 %
Adheze:	< 68 MPa	> 68 MPa	> 68 MPa
Obsah oxidů:	střední	žádný	žádný

Tabulka 2. Charakteristika vlastností povlaku.[4]

Vysoká teplota a rychlost dopadajících částic vedou ke vzniku povlaku s velmi jemnou a hustou strukturou a s vysokou adhezí k základnímu materiálu. Obsah oxidických částic závisí na technologii nástřiku – při APS nástřiku dochází k míšení inertního plazmového plynu s plyny v atmosféře ( $N_2$ ,  $N_2$ ), které mohou s letícími natavenými částicemi reagovat a vytvářet oxidické nebo jiné vměstky ve struktuře povlaku. Při VPS nástřiku nebo při nástřiku v komoře s inertním plynem je interakce kyslíku s částicemi vyloučena a výskyt oxidů ve struktuře zcela eliminován.[5]

### ***Plazmatický nástřik v řízené atmosféře:***

Informace uvedené v předchozích kapitolách se týkaly zejména plazmatického nástřiku, prováděného v neřízené atmosféře. Přítomnost některých plynů ve vzduchu (zejména  $N_2$ ), které reagují s letícími natavenými částicemi, vede k výskytu oxidických nebo i jiných vměstků ve výsledné struktuře povlaku. Z toho důvodu byly navrženy nástřikové systémy, nahrazující reaktivní atmosféru atmosférou inertních plynů nebo omezující přístup reaktivních plynů k částicím pomocí sníženého tlaku.

### ***Nástřik ve vakuu (VPS):***

Zařízení pro VPS neboli LPPS nástřik se od konvenčního zařízení pro plazmatický nástřik liší hlavně dálkovým ovládáním pistole, vakuovým systémem a chlazením nástřikové komory.

V porovnání s APS nástřikem vykazuje VPS nástřik tyto rozdílné procesní charakteristiky:

- Širší a delší proud plazmatu
- Čistší rozhraní mezi povlakem a substrátem
- Povlak bez oxidických vměstků
- Vysoká hustota povlaku, blízká hustotě objemového materiálu
- Větší možná tloušťka nástřiku (> 25 mm)
- Možnost předehřevu povlaku i substrátu na vysoké teploty

### ***Plazmatický nástřik se stíněním (shrouded):***

V tomto případě je ke snížení obsahu oxidů ve struktuře a zlepšení hustoty povlaku použito stínění proudu plazmatu inertním plynem, obvykle argonem nebo dusíkem. Omezení přístupu kyslíku do proudu plazmatu a jeho nahrazení Ar vede kromě snížení výskytu oxidů také k vyšší teplotě a prodloužení proudu plazmatu, což má za následek vyšší protavení částic prášku. Komerčně je tento princip využíván pouze pro speciální typy povlaků.[3]

### ***Podvodní plazmatický nástřik (UPS):***

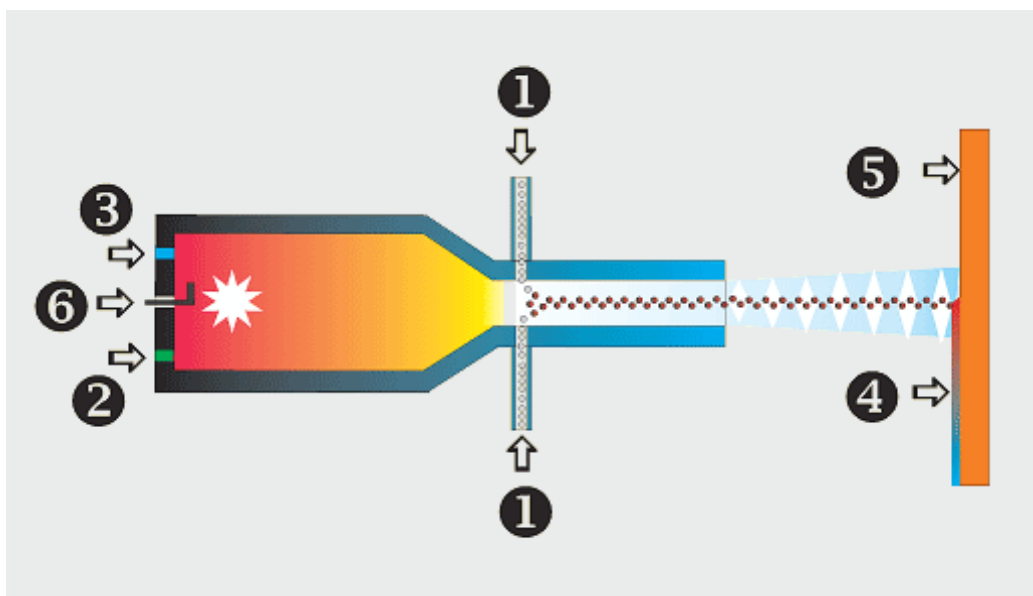
Jedná z možností plazmatického nástřiku je nástřik ve vodním prostředí, používaný pro toxické nebo drahé materiály, či v případě nutnosti kontroly reaktivních nebo toxických zplodin vzniklých při nástřiku. Zařízení pro nástřik pod vodou je kromě nutné izolace, vodního tanku a určitých změn při zapalování obdobné zařízení pro APS nástřik. Při nástřiku pod vodou dochází také ke zkrácení depoziční vzdálenosti. A k omezení výskytu oxidů ve struktuře povlaku. Přístup kyslíku k letícím částicím je omezen obálkou bublin inertního plazmového plynu, které se pod vodou v okolí proudu plazmatu vytváří. Krátká depoziční vzdálenost má za následek vysokou rychlost dopadu částic na substrát. Takto zvyšuje kvalitu povlaku. Výhodou vodního prostředí je také intenzivní chlazení vedoucí k velmi malému teplotnímu ovlivnění. Což umožňuje i nástřik materiálů na bázi polymerů.[4]

## **1.6 Nástřik HVOF**

U tohoto procesu dochází v hořácích k hoření směsi kyslík - palivo (kerosin, propylen, propan, acetylen, vodík atd.). Produkty hoření jsou urychlovány v konvergentně divergentní trysce až na supersonické hodnoty. Materiál ve formě prášku je za pomoci nosného plynu přiváděn do supersonického plamene, kde dojde k jeho natavení a výraznému urychlení směrem k povlakované součásti. Vysoká rychlost částic prášku při dopadu způsobí dokonalé rozptýlení a zakotvení částic k substrátu, z čehož se odvíjí vysoká hustota a přilnavost HVOF stříkaných povlaků. Relativně nízká teplota plamene (ve srovnání s plazmatickým nástřikem) omezuje tuto technologii pro nástřik keramických povlaků, kdy nedojde k dostatečnému natavení prášku během letu, a tím pádem ani k rozptýlení po dopadu na substrát. Nízká teplota na druhou stranu zabraňuje oxidaci, fázovým přeměnám a vyhořívání některých prvků nanášeného materiálu v průběhu nástřiku. Unikátní vlastností této technologie je, že při vhodné volbě depozičních parametrů poskytuje povlaky v tlakovém pnutí, což umožňuje vytvářet povlaky velkých tloušťek. Tlakové pnutí v povlaku je rovněž příznivé z hlediska únavových vlastností povlakovaných součástí.[3,6,7]

Legenda k obrázku:

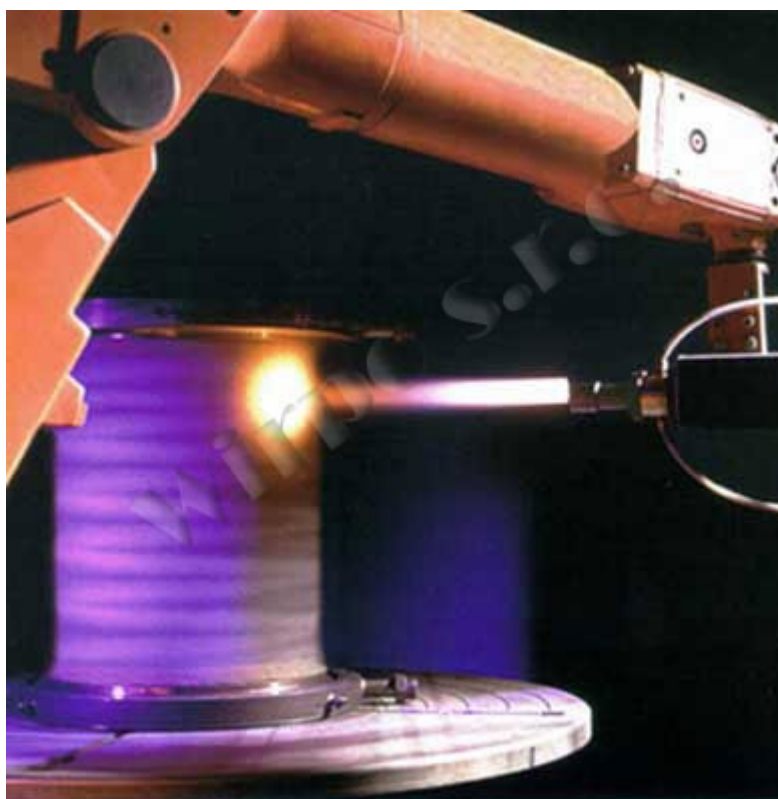
1. Přídavný materiál - prášek
2. Přívod kerosinu
3. Přívod kyslíku
4. Nástřik
5. Podklad
6. Zapalovací svíčka



Obr. 4. Schéma nástřiku metodou HVOF.[4]

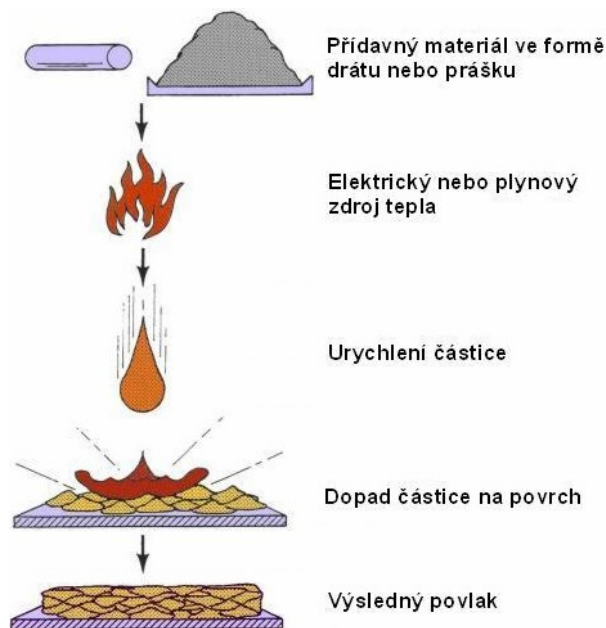
**Charakteristiky procesu:**

- Rychlost plamene: 500-1200 m/s
- Teplota plamene: 5 500 K
- Použité plyny:  $\text{CH}_4$ ,  $\text{C}_3\text{H}_6$ ,  $\text{H}_2$ ,  $\text{O}_2$
- Průtok plynu: 400-1100 slm
- Rychlost částic: 200-1000 m/s
- Teplota částic: 3 300 °C
- Průtok prášku: 15-50 g/min

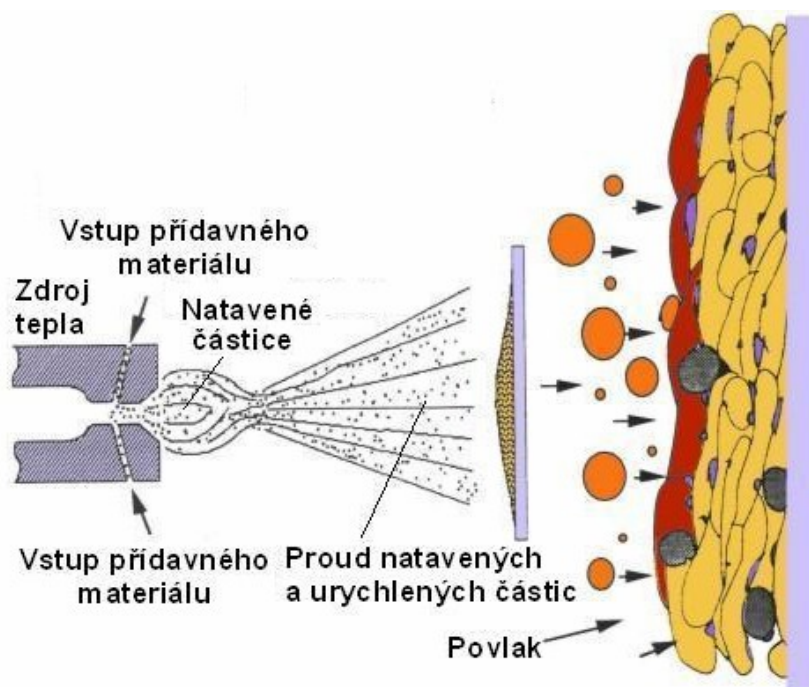


Obr. 5. Nanášení vrstvy na spalovací komoru.[5]





Obr. 6. Vznik povlaku, na kterém je znázorněno, jak vznikají póry ve struktuře povlaku.[4]



Obr. 7. Schéma procesu vytváření žárových nástřiků [4]

### Výhody:

- vysoká rychlost částic umožňuje připravovat vrstvy s nízkým obsahem pórů ( $< 1\%$ ) a s vysokou adhezivní
- pevností v tahu ( $> 80 \text{ MPa}$ ) ve srovnání se základním materiálem,
- díky malé drsnosti povrchu po nástřiku zcela odpadá nebo je jen v malé míře nutné provádět jeho
- mechanické úpravy,

- proti metodě plasmového nástřiku dochází méně často k teplotně vyvolaným změnám v nástřikovém
- materiálu a
- při použití vodíku jako topného plynu je možno udržovat na nízké hladině pohlcování kyslíku vrstvou.

#### ***Nevýhody:***

- značné náklady na napájení plynem (zásobník s kapalným propanem a vyhřívaná dopravní trasa),
- většinou je nezbytné dostatečně chladit nástřikovanou součást, protože u ní dochází k vyššímu vnosu tepla než při plasmovém nástřiku,
- nižší stupeň účinnosti při nanášení materiálů s vyšším bodem tání ve srovnání s plasmovým nástřikem,
- vyšší spotřeba injekčního plynu a tím i specifické provozní náklady ve srovnání s plasmovým nástřikem,

Oblast použití termického nástřiku je díky celé paletě použitelných materiálů velmi široká. Typickými příklady jsou:

- ochrana proti opotřebení
- ochrana proti korozi
- ochrana proti oxidaci
- zhotovování kluzných vrstev
- zhotovování adhezních vrstev
- opravy a obnova lokálně poškozených povrchů
- speciální případy použití

Vzhledem k tomu, že metoda HVOF nástřiků byla původně vyvinuta pro nanášení karbidů kovů jako ochranné vrstvy proti opotřebení, je tato aplikace stále ještě hlavní oblastí jejího použití. Jak ve výzkumu, tak při četných použití se HVOF vrstvy osvědčily jako maximálně odolné vůči třem základním mechanismům opotřebení, abrazi, erozi a kavitaci. Možnost zpracovávat na velmi kompaktní vrstvy s velmi nízkým obsahem kyslíku i kovové slitiny otvírá HVOF technologii v rostoucí míře možnost použití pro ochranu proti korozi a oxidaci jakož i pro výrobu nosných struktur.[4,5,7]

#### ***Příklady použití:***

- kulové a deskové ventily,
- komponenty pro extrudéry plastických hmot,
- rotory a písty kompresorů a čerpadel,
- oběžné plochy velkých motorů,
- kotouče pro tažení drátu,
- trysky hořáků,
- pláště a vodicí plochy hydraulických válců,
- válce pro výrobu papíru a fólií,
- síta pro solný průmysl,
- kluzné plochy kolejových výhybek

- plochy lopatek vodních turbin a velkých ventilátorů a
- nejružnější hřídele

## **2. Rozbor používaných přídavných materiálů**

### ***Materiály pro žárové nástřiky:***

- Přídavné materiály – prášky, dráty, tyčinky
- Krytovací materiály – pásy, plechy, gumy, umělé hmoty, atd.
- Zatěsňovací materiály – organické, anorganické.

Dráty se používají především pro nástřik kovových materiálů a slitin technologiemi nástřiku elektrickým obloukem a plamenem. Výroba drátů je součástí jiných oborů a z tohoto důvodu se jí nebudeme podrobněji zabývat. Speciálním typem, vyvinutým pro nástřik elektrickým obloukem, jsou materiály kombinující nástřik prášku a drátu. Jedná se o tzv. trubičkové dráty, tvořené slitinovým obalem naplněným tvrdými částicemi karbidů, boridů atd.[4]

Používání keramických tyčinek jako přídavného materiálu je v této oblasti velmi málo rozšířené. V podstatě pouze systém pro nástřik plamenem Rokide (Gartner a Walker, 1980) používá tyto tyčinky. Důvod omezeného používání tyčinek je, že relativně krátké keramické tyčinky se spotřebují za několik málo minut a následně je třeba proces nástřiku přerušit a vložit novou tyčinku. Z tohoto důvodu je možné vytvářet povlaky pouze na menších součástech. Na druhou stranu je třeba podotknout, že letící natavené částice mají téměř stejnou velikost a výsledný povlak je v porovnání s povlaky připravenými z prášku velmi homogenní.[4]

### ***Materiál stříkaných povlaků:***

- Čisté kovy
- Slitiny a super slitiny
- Oceli
- Cermety
- Keramika



Obr. 8. Foto přídavných materiálu ve formě prášků.

### ***Přídavné materiály na kovové bázi:***

Jde o přídavné materiály používané od vzniku technologických metod žárového nástřiku. Je to logické, jelikož z důvodu možností technologie výroby se původně přídavný materiál používal jen ve formě drátu. V dnešní době se přídavné materiály na kovové bázi vyrábějí jak ve formě drátu, tak také ve formě prášku. Nejjednodušší jsou kovové přídavné materiály na bázi čistého kovu (Mo, W, Cr, Zn, Ni a Cu), nicméně se v čisté formě používají jen v malé míře. Například nástřiky Al a Zn se používají jako protikoroze ochrana, nástřik Mo se aplikuje pro jeho velmi dobré kluzné vlastnosti.

Mnohem častěji se setkáváme s aplikací slitin těchto kovů a s aplikací přídavných materiálů na bázi oceli, hlavně oceli s obsahem Cr a se zvýšeným obsahem uhlíku (až 0,4%C). Zejména se tyto materiály využívají v oblasti renovací. Dále bronzí se aplikují na funkční plochy strojních součástí, od kterých se požadují dobré kluzné vlastnosti, slitiny na povlaky se zvýšenou tvrdostí a odolností proti opotřebení. Další slitiny kovů se používají na různé aplikace podle vlastností, které vykazují povlaky těmito slitinami vytvořené.

### ***Přídavné materiály na keramické bázi:***

V 80. letech minulého století, kdy to bylo umožněno technicky vyspělejšími přístroji pro žárové nástřiky, se vedle přídavných materiálů na kovové bázi začaly aplikovat také keramické přídavné materiály. Důvodem použití keramických materiálů byly jejich v některých směrech vynikající vlastnosti, jako např. tvrdost, odolnost proti otěru a zejména tepelně izolační vlastnosti.[4]

Jedná se nejen o oxidické keramické materiály, ale také o neoxidické keramické materiály a o sloučeniny, jako jsou karbidy, nitridy, boridy a další. Tyto přídavné materiály se používají hlavně v práškové formě, nicméně v dnešní době se začínají do širší praxe zavádět i ve formě tzv. trubičkových drátů pro technologii nástřiku elektrickým obloukem.

Jedním z nejčastěji používaných keramických přídavných materiálů je ekonomicky výhodný oxid  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , dále pak oxidy  $\text{ZrO}_2$ ,  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ ,  $\text{ZrSiO}_4$  a další. Oxidy  $\text{Al}_2\text{O}_3$  a  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  se aplikují vzhledem k vynikající odolnosti proti otěru a opotřebení,  $\text{ZrO}_2$  a  $\text{ZrSiO}_4$  pro své dobré tepelně izolační vlastnosti. Oxidické keramiky se, až na malé výjimky, používají v kombinaci s tzv. stabilizátory, jako jsou  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{MnO}$ ,  $\text{CaO}$  a další, které stabilizují určitou fázi těchto keramických materiálů a zajišťují tak nanesenému povlaku požadované vlastnosti.[5]

Z neoxidických keramických přídavných materiálů se používá např. karbidy ( $\text{TiC}$ ,  $\text{SiC}$ ,  $\text{B}_4\text{C}$ ,  $\text{WC}$ ), nitridy ( $\text{AlN}$ ), silicidy ( $\text{MoSi}_2$ ). Předností těchto materiálů je zejména vysoká tvrdost. Stejně jako oxidické keramiky se i neoxidické samostatně nanášejí jen výjimečně. Obvykle se používají cermety, tzn. keramika pojená kovem.

Keramické přídavné materiály mají velmi široké pole uplatnění a možnosti těchto materiálů se s vývojem modernějších aplikačních zařízení stále zvětšují.[5]

### ***Speciální typy materiálů:***

Do skupiny speciálních přídavných materiálů patří už výše zmíněné cermety. Tyto přídavné materiály spojují výhody kovů (tažnost, houževnatost) s některými výhodami keramických přídavných materiálů (tvrdost, vysoká teplota tavení) a umožňují tak získat povlaky s výhodnými vlastnostmi. Jsou to např. WC+Co 8-12%, Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>+NiCr 25% a jiné.

Další přídavné materiály, které jsou stejně jako cermety složeny z několika složek (kovových i nekovových), ale neobsahují keramickou složku. Jedná se např. o materiál Ni-grafit, který se používá pro žárový nástřík výsterek a labyrintových ucpávek proudových motorů. Nikl v tomto případě vytváří obálku na grafitu a chrání jej tak proti oxidaci a rozkladu při vysokých teplotách během nástřiku. Ještě zajímavější skupinou přídavných materiálů jsou materiály s exotermickým účinkem. Tato skupina není příliš početná, ani není zastoupena velkým počtem přídavných materiálů. Vlastností těchto materiálů se využívá pro zvýšení přilnavosti povlaku k základnímu materiálu a to pomocí nástřiku tzv. vazné mezivrstvy. Jde především o materiály na bázi Ni-Al a Ni-Ti. Aby měl přídavný materiál exotermický účinek, nesmí být ve formě tuhého roztoku Ni a Al popř. Ni a Ti, ale částice přídavného materiálu ve formě prášku musí být tvořeny tak, že jádro bude z Al (nebo z Ti) a Ni bude tvořit obal. U přídavného materiálu z drátu je trubičkový obal z Ni naplněn částicemi Al (nebo Ti).[5]

### ***Metody pro výrobu práškových materiálů:***

Prášky používané pro žárové nástřiky lze podle materiálu rozdělit do následujících skupin:

- Kovy (např. molybden, nikl) a slitiny (např. na bázi železa, niklu, kobaltu)
- Oxidické keramiky (např. Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) Cermety (např. WC-Co)
- Karbidy (např. Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>) Ostatní speciální prášky (např. slitina AlSi aglomerovaná se 47% polyamidu) Směsi jednotlivých druhů prášků.

Metody průmyslové výroby prášků jsou nejvíce závislé na druhu materiálu. Kovy a slitiny se vyrábí zejména atomizací, někdy sintrováním. Oxidy a karbidy se vyrábí litím (příp. sintrováním) a následným drcením na požadovanou zrnitost. Kompozitní materiály se vyrábí například povlakováním. [5]

Nejuniverzálnější metodou výroby prášků je aglomerizace neboli sušení rozstříkem umožňující spojení libovolných malých částic jednotlivých materiálů v kulový aglomerát obsahující všechny složky. Prášky připravené touto metodou jsou obvykle dále zpracovávány pro jejich zhuštění, a to např. sintrováním nebo plazmovým zhuštěním.[6,7]

### ***Faktory ovlivňující kvalitu, ekonomiku a reprodukovatelnost nástřiku:***

Při výběru prášku pro žárový nástřík je důležité brát v úvahu všechny aspekty ovlivňující kvalitu povlaku, ekonomiku provozu a v neposlední řadě reprodukovatelnost nástřiku. Vlastnosti povlaku a jejich následná funkčnost jsou vždy výsledkem vzájemné interakce mezi procesem nástřiku a složením a morfologií prášku. Je důležité dívat se na nástřík jako na komplexní systém a brát v potaz všechny vstupující parametry. Pochopení tohoto vztahu nám pomůže přesně definovat jaký prášek je třeba pro dosažení požadované kvality povlaku a jeho následnou úspěšnou aplikaci.[6]

***Existuje sedm základních faktorů, které mají vliv na výslednou kvalitu povlaku:***

1. Metoda přípravy
2. Tvar částic
3. Tekutost
4. Hustota
5. Zrnitost
6. Rozsah a rozložení zrnitosti
7. Jednotnost mezi dávkami

### ***Vlastnosti povlaků:***

Mezi základní vlastnosti povlaků můžeme zařadit následující parametry:

- přilnavost povlaku k základnímu materiálu (adheze)
- soudržnost povlaku (koheze)
- pórovitost povlaku
- tvrdost, mikro tvrdost
- lomová houževnatost
- teplotní a tepelná roztažnost
- elektrické vlastnosti.

Pro zjišťování těchto základních vlastností povlaků existuje celá řada metodik. Některé jsou uvedeny v normách, některé metodiky byly vypracovány vědeckými a výzkumnými pracovišti a prezentovány na různých konferencích a v odborných časopisech. Vzhledem k různým postupům při vyhodnocování výše uvedených vlastností, nelze ve většině případů porovnávat naměřené hodnoty získané různými metodikami, ale výsledky získané pouze jednou metodikou. Rovněž příprava vzorků je velmi důležitá pro obdržení reprodukovatelných výsledků.

Při ověřování výše uvedených vlastností je rozhodující, zda se zkoušky provádějí na zkušebních strojích, resp. přímo v provozních podmínkách nebo na experimentálních zařízeních, které pouze napodobují provozní podmínky, ve kterých povlak pracuje. U těchto experimentálních zařízení je velice obtížné napodobit konkrétní pracovní podmínky v zařízení a výsledky při porovnávání různých typů materiálů mohou být v některých případech zavádějící. [5]

### ***Praktické příklady využití povlaků vytvořených technologií žárového nástřiku:***

V následující tabulce jsou uvedeny některé příklady využití povlaků vytvořených technologií žárového nástřiku podle mechanismu opotřebení resp. Vlastnosti povrchu. Pro jednotlivé charakteristické vlastnosti povrchu povlaků uvádíme některé typické aplikace a příslušné materiály povlaku.[5]

Mezi vlastnosti, které mají přímý vliv na úspěšnost aplikace povlaků vytvořených technologií žárového nástřiku v praxi, můžeme zařadit:

- odolnost proti otěru, erozi, abrazi

- odolnost proti korozi a oxidaci za nízkých a vysokých teplot
- odolnost proti erozi plyny a kapalinami
- odolnost proti kavitaci
- odolnost proti jiskře.

<b>Mechanismus opotřebení, Vlastnosti povrchu povlaku</b>	<b>Typické aplikace</b>	<b>Vhodné povlaky</b>
Adheze	Kluzná ložiska, vymačkané plochy čepů válců, vedení	Bronz, kompozice, Mo, Cr <sub>3</sub> C <sub>2</sub> /NiCr
Abraze, Eroze	Šneky, plunžry, pístní tyče, části sklářských forem	WC/Co, Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , NiCrBSi
Kavitace	Komory vodních turbín, rozváděcí lopatky vodních turbín, komory čerpadel, vložky válců spalovacích motorů	Chromuhlíková martenzitická 23olářských23í ocel, hliníkový bronz, NiCrBSi,
Otěr	Součástky textilních strojů, kluzná uložení, pneumatické a hydraulické prvky, vedení	WC/Co, Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , Mo, NiCrBSi,
Tepelné bariéry	Komponenty komor spalovacích a proudových motorů, části 23olářských forem	ZrO <sub>2</sub> /CaO/MgO/Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , ZrSiO <sub>4</sub> ,
Vysokoteplotní koroze	Rozváděcí a oběžné lopatky plynových turbín, pecní systémy	Systémy MCrAlY, NiCr,
Atmosférická koroze	Ocelové konstrukce, případně jiné díly vystavené atmosférické korozi	Al, Zn, Zn/Al, nerezavějící ocel
Chemická koroze	Těsnící a ucpávkové plochy chemických zařízení	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ,
Elektrická vodivost	Keramické izolátory	Cu, CuSn10
Elektrická izolace	Izolátory, kondenzátory	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ,
Těsnící obrušující se povlaky	Labyrinty břitových těsnění parních a spalovacích turbín	Ni-grafit, AlSi-polyester
Biologické povlaky	Endoprotézy, dentální implantáty	Ti, hydroxylapatit, fluorapatit

Tabulka 3. Přehled využití povlaku, jejich složení, vlastnosti a opotřebení. [5]

### **3. Realizace experimentálního programu, ověření užitných vlastností HVOF nástřiků na bázi WC – Co:**

Vytváření povlaků metodou žárového nástřiku HVOF je jednou z alternativ povrchové úpravy funkčních ploch hydraulických a pneumatických prvků. U těchto součástí jsou kladeny značné nároky na odolnost proti otěru, tvrdost povrchu, dobré kluzné vlastnosti, korozivzdornost atd.

Tyto plochy bývají upravovány technologiemi tvrdého chromování, nitridací, navařování nerezových materiálů, ale každá z těchto metod má díky jejich technologickému postupu určitá omezení. Zejména v oblasti renovací a také při povlakování větších dílů se jeví metoda žárového nástřiku jako nejvýhodnější.

#### ***Technologický postup přípravy vzorků:***

- Nařezání silnostěnné trubky
- Povrchová úprava (tryskání)
- Upnutí vzorků na nosnou tyč
- Nástřikání povlaků na vzorek metodou HVOF (zařízení TAFA JP 5000)
- Vložení vzorků do media.

Medium je tvořeno jednak nebělenou sulfátovou buničinou o teplotě 60-80°C (abrasivní vliv) a dále roztokem ClO<sub>2</sub> (oxid chloričitý nebo též chlórdioxid) o koncentraci 8 – 9 g/l. Teplota roztoku ClO<sub>2</sub> je cca 10°C. Roztok obsahuje též residuální chlor (max. 0,1 g/l) a jeho pH je 2-3.

Zařízení pro žárový nástřik bylo použito TAFA JP 5000.

#### ***Parametry pro jednotlivé nástřiky:***

<b><i>Povlak</i></b>	<b><i>Spalování</i></b>	<b><i>Kyslík průtok</i></b>	<b><i>Palivo průtok</i></b>	<b><i>Voda max [°C]</i></b>	<b><i>Voda [°C]</i></b>
<b><i>1375</i></b>	98 ± 5	129 ± 10	120 ± 10	70	120 ± 10
<b><i>1343</i></b>	105 ± 5	143 ± 10	123 ± 10	70	120 ± 10
<b><i>1350</i></b>	103 ± 5	136 ± 10	120 ± 10	70	125 ± 10

Vzorky na které, byl nanesen žárový povlak metodou HVOF jsou ve tvaru silnostěnné trubky (viz. obr. 9. a 10.). Žárový materiál byl rovnoměrně nanášen na povrch vzorku. Při průběhu nástřiku se vzorek ve tvaru trubky plynule otáčel okolo své osy. Pro experiment byly zvoleny tři materiály pro žárový nástřik HVOF. Pro všechny tři přídavné materiály byly zhotoveny tři vzorky. Po úpravě těchto vzorků žárovým nástřikem HVOF byly vzorky vloženy do media a to po dobu 24 hodin, jednoho týdne a jednoho měsíce.

Při použití stroje STRUERS – DISCOTOM – 6 byly vzorky rozřízlé. Na stroji STRUERS – TEGRA DOSER – 5 se vybrousily do čista a to při použití brusných papírů s hustotou zrn (80, 180, 380, 500, 800, 1200 a 2400). Dále proběhlo leštění použitím molu a segmentové desky. Vyleštěný povrch se naleptal kyselinou. Vzorek byl ustaven na mikroskop, kde se vyhotovily fotografie a to ve zvětšení (100x, 200x a 500x). Zde byla změřena tloušťka povlaku.





Obr. 9. Plocha vzorku, na které je zhotovený povlak, zvětšení 1x.



Obr. 10. Zvolený tvar vzorku, zvětšení 1x.

### **Vzorek 1 (značení 1375):**

Tento typ vzorku byl v mediu pouze 24 hodin. Protože po jeho vytažení byl povlak hodně porézní a odlupoval se. Po jeho prozkoumání a úpravách jsme se rozhodli tento typ vzorku vyřadit z experimentu. Vzorek 1 s povrchovým materiálem (1375) je nevyhovující kvůli korozi povlaku.

***Materiál:***  $\text{Cr}_3\text{C}_2 - 25\text{NiCr}$   
                     Ni – 20%      C – 10%

### ***Povlak vlastnosti:***

- Vynikající proti vysoké-teplotě kavitace, otěru a opotřebení kluzné
- Odolnost proti korozi
- Velká hustota a tvrdost povlaku
- Použití do 870 °C.

**Použití:**

- Turbínové motory
- Zařízení pro tažení drátů
- Ventilátory
- Součástky čerpadel
- Šoupátka
- Pístní kroužky.

Velmi špatná přilnavost základního materiálu a povlaku spěje k negativním výsledkům pro tento typ materiálu. Na obrázcích vidíme velké vady porózity, trhlin, nestabilní tloušťka povlaků a jeho negativní struktura (viz. obr. 11 – 14). Na povrchu je povlak znehodnocen korozí.

Kvalita povlaku: Nevyhovující.

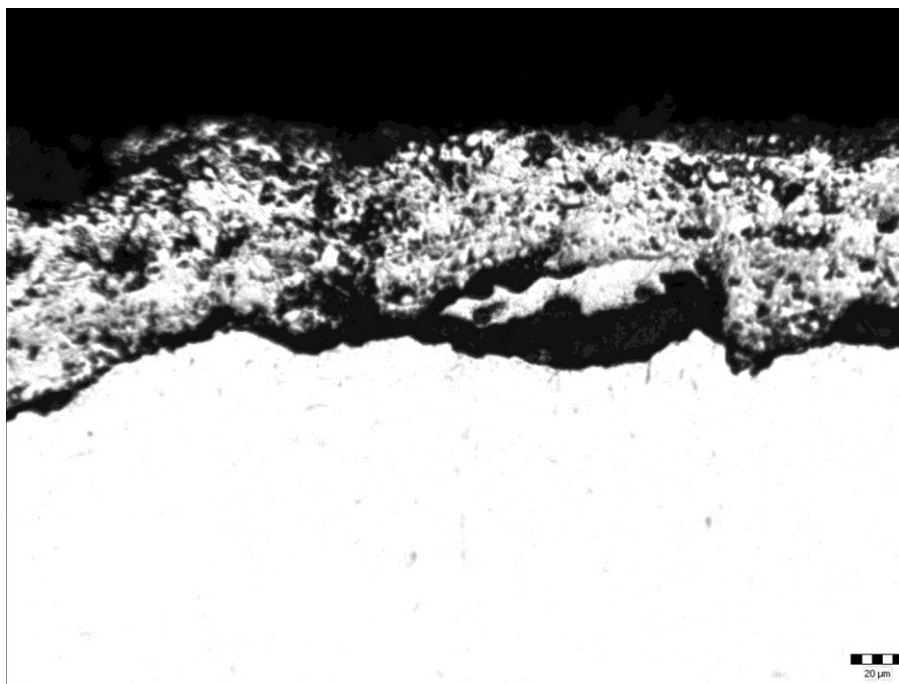
Typ objektu	Druh měření	Číslo měření	Hodnota	Jednotky	Popis	Statistiky		
Úsečka	Délka	1	110	μm		Veličina	Délka	
Úsečka	Délka	2	110	μm		Počet měření	8	
Úsečka	Délka	3	84	μm		Střední hodnota	96,6	μm
Úsečka	Délka	4	92	μm		Sm. odchylka	10,8	μm
Úsečka	Délka	5	106	μm				
Úsečka	Délka	6	100	μm				
Úsečka	Délka	7	81	μm				
Úsečka	Délka	8	90	μm				

Tabulka 10. Naměřené tloušťky povlaku (1375).



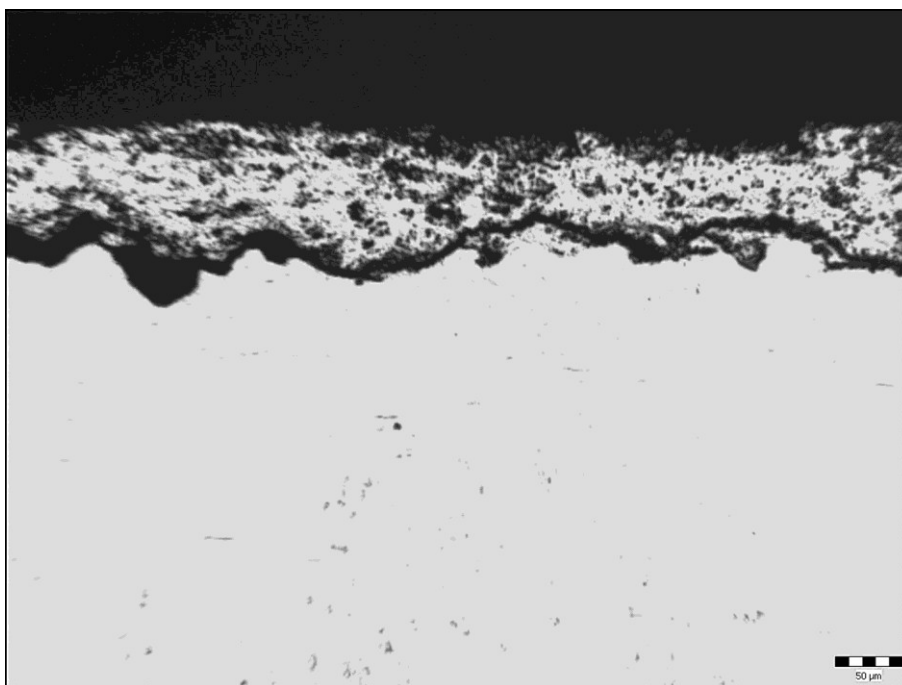
Obr. 11. Povrch vzorku 1375.

Na obr. 11 je znázorněn povrch žárového nástřiku. Povrch byl z 95% napaden korozí a také odpadával od základního materiálu.

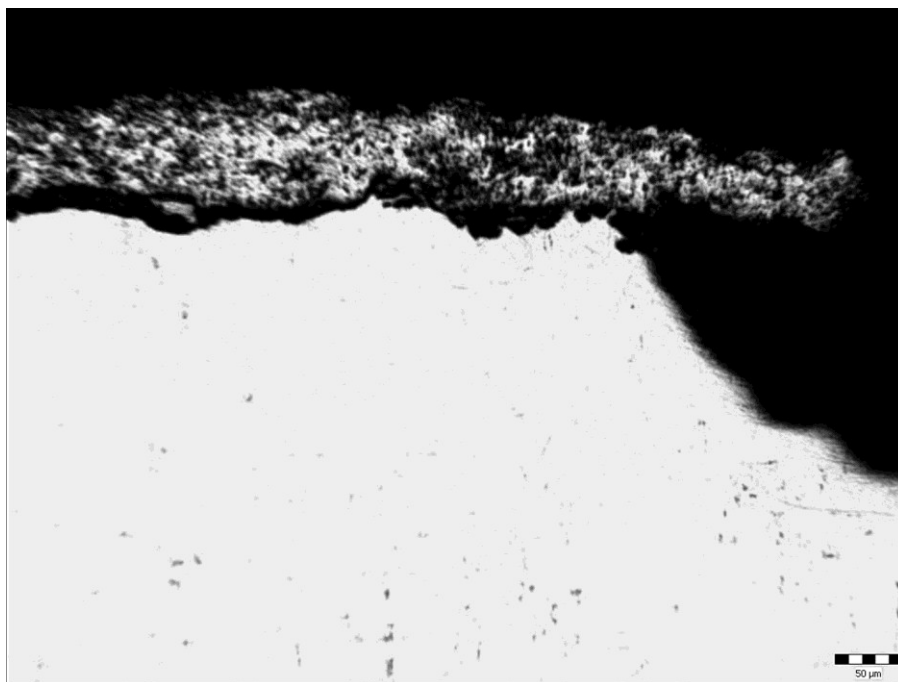


Obr. 12. Mikrostruktura povlaku, neleptáno a zvětšeno 200x.

Na povrchu vzniklé póry, materiál je nesoudržný. V povlaku jsou vidět praskliny a trhlinky. Na povrchu povlaku lze shlédnout, kde se nástřík odloupl.



Obr. 13. Mikrostruktura povlaku neleptáno a zvětšeno 100x.



Obr. 14. Mikrostruktura vzorek neleptán, zvětšen 100x.

### **Vzorek 2 (označení 1343):**

Vzorek byl v mediu po všechny zkušebními doby. Povlak má dobrou přilnavost na základní materiál. Na povrchu vzorku se objevuje jen malé procento pórovitosti.

### ***Materiál:***

WC – 77 %    Co – 17 %    C – 4 %    Fe – 1%    ostatní – 1%

### ***Povlak vlastnosti:***

- Vynikající tekutost
- Robustné a husté vrstvy s jemnou mikrostrukturou
- Hladký a pevný povlak s vysokou přilnavostí
- Vysoká odolnost proti abrazi, erozi a posuvného opotřebení
- Použití do 480 °C

### ***Použití:***

- Pro papírny
- Čerpadla
- Zařízení pro tažení drátů
- Ventilátory
- Kompresory
- Letectví.

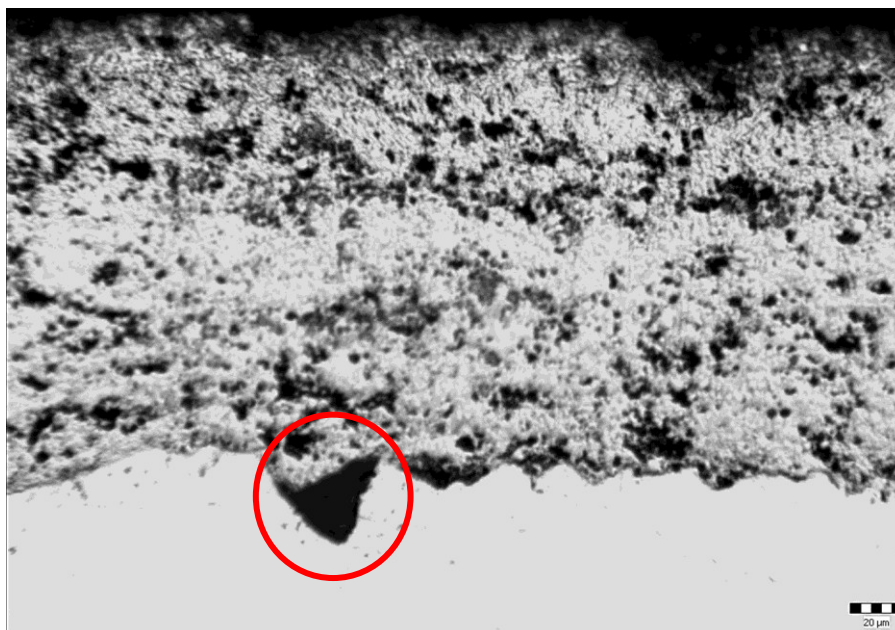
Povlak má dobrou přilnavost k základnímu materiálu. Větší struktura zrnitosti není problémem. V tomto povlaku se vyskytuje nejmenší procento nežádoucích vad, a proto tento povlak by měl být pro experiment nejideálnější. Vměšky, které jsou vidět na fotografiích jsou způsobené nástřikem materiálu.

Kvalita povlaku: Dobrá.

Typ objektu	Druh měření	Číslo měření	Hodnota	Jednotky	Popis	Statistiky		
Úsečka	Délka	1	104	μm		Veličina	Délka	
Úsečka	Délka	2	103	μm		Počet měření	8	
Úsečka	Délka	3	112	μm		Střední hodnota	98,5	μm
Úsečka	Délka	4	109	μm		Sm. odchylka	9,9	μm
Úsečka	Délka	5	91	μm				
Úsečka	Délka	6	80	μm				
Úsečka	Délka	7	96	μm				
Úsečka	Délka	8	93	μm				

Tabulka 11. Naměřené tloušťky povlaku (1343).

Obrázky (15, 16 a 17) jsou fotky povrchů povlaků vzorků, které byly v lázni 24 hodin.

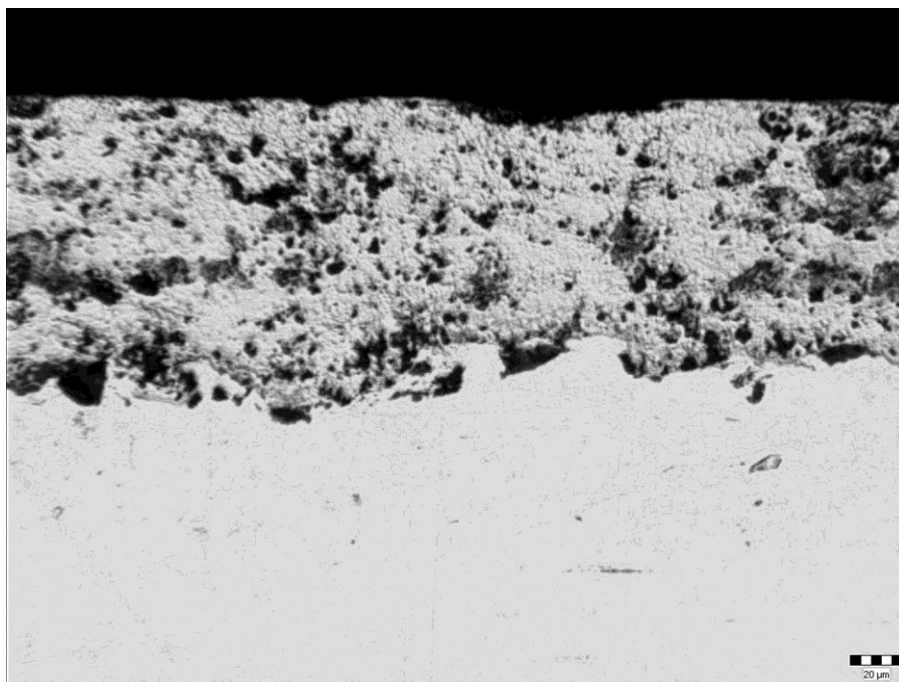


Obr. 15. Mikrostruktura, neleptáno, zvětšeno 200x.

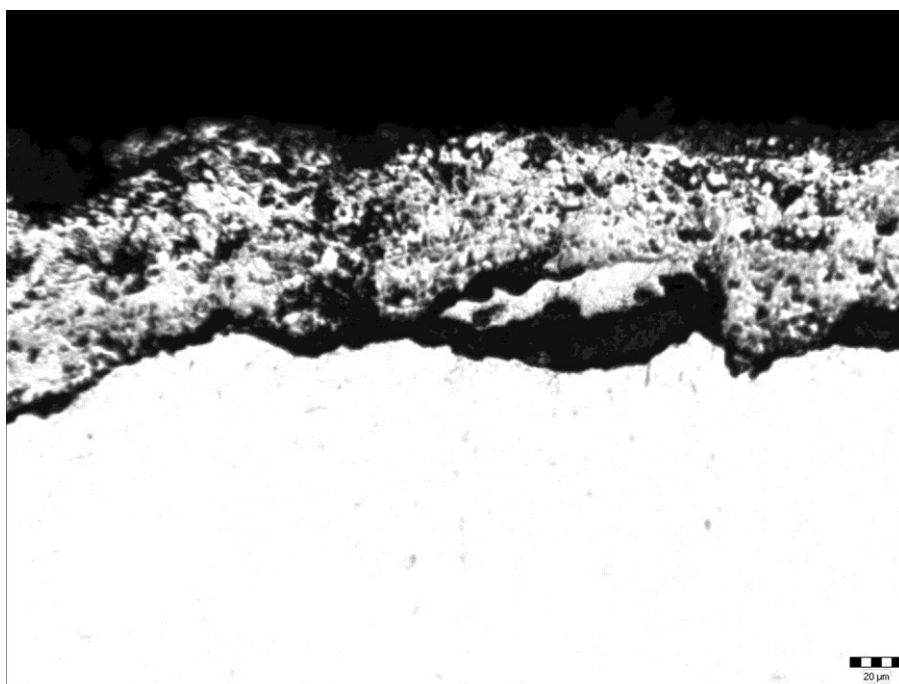
#### ***Materiál povlaku:***

- Soudržná vazba materiálu
- Dobrá přilnavost povlaku se základním materiálem
- Na označeném detailu je vzniklý pór.

Po otrískání základního vzorku vznikla na jeho povrchu jáma, do které se žárový nástřik nedostal. Nebere se jako vada povlaku, ale jako vada přípravy vzorků.



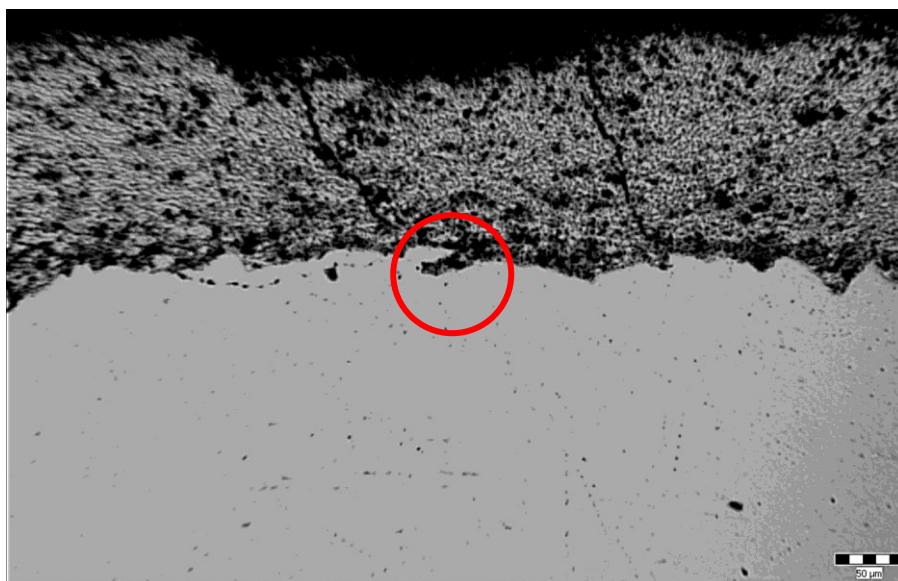
Obr. 16. Mikrostruktura, neleptáno a zvětšeno 200x.



Obr. 17. Mikrostruktura, leptáno a zvětšeno 200x.

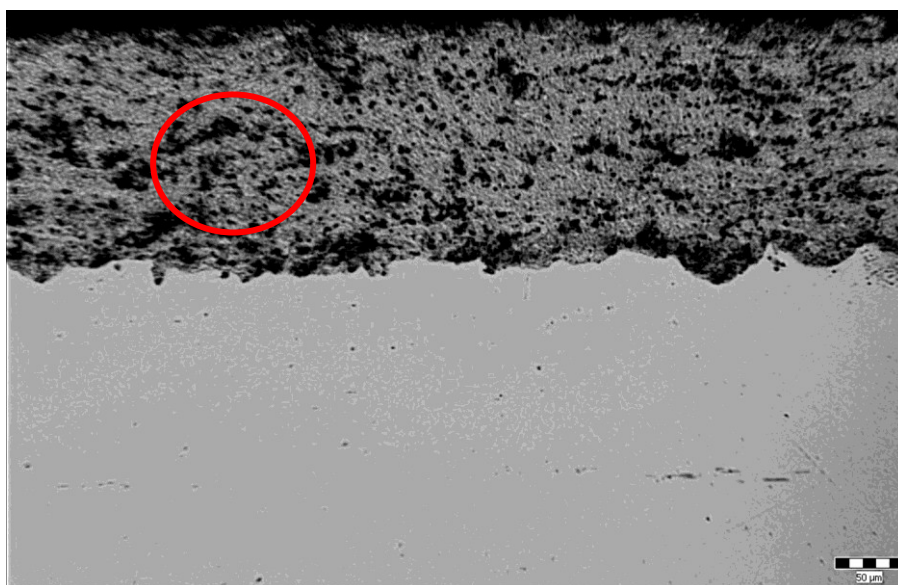


Obrázky (18 a 19) jsou fotky povrchů povlaků vzorků, které byly v lázni jeden týden.



Obr. 18. Mikrostruktura, neleptáno a zvětšeno 100x.

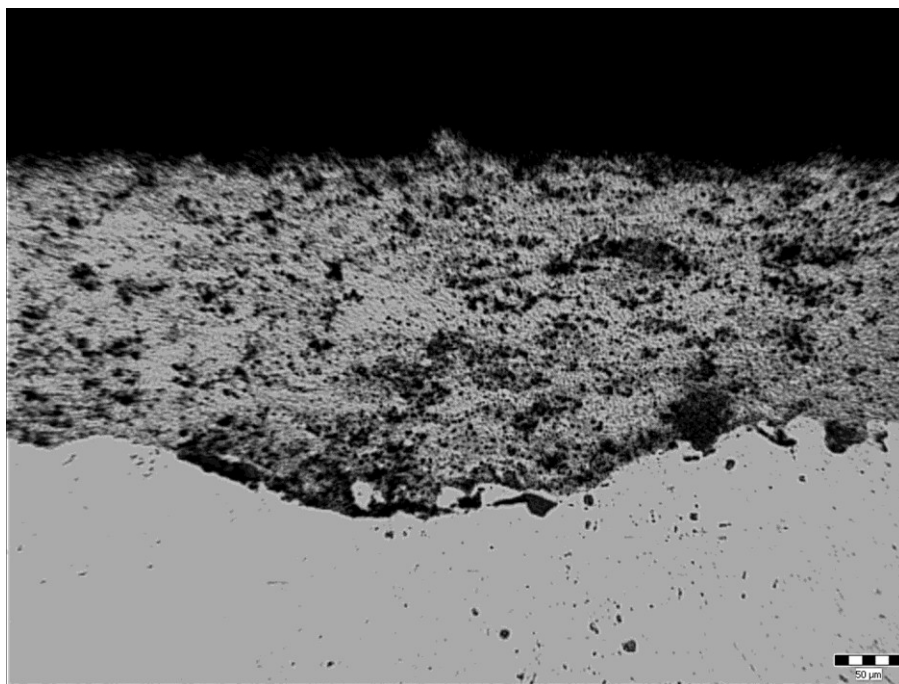
Trhliny na detailu povlaku slouží u kluzných povlaků k dobrému zatečení oleje. Menší nerovnosti na povrchu povlaku rovněž slouží k dobrému zatékání oleje. Na označeném detailu vidíme dokonalé zatečení nástřiku.



Obr. 19. Mikrostruktura, neleptáno a zvětšeno 100x.

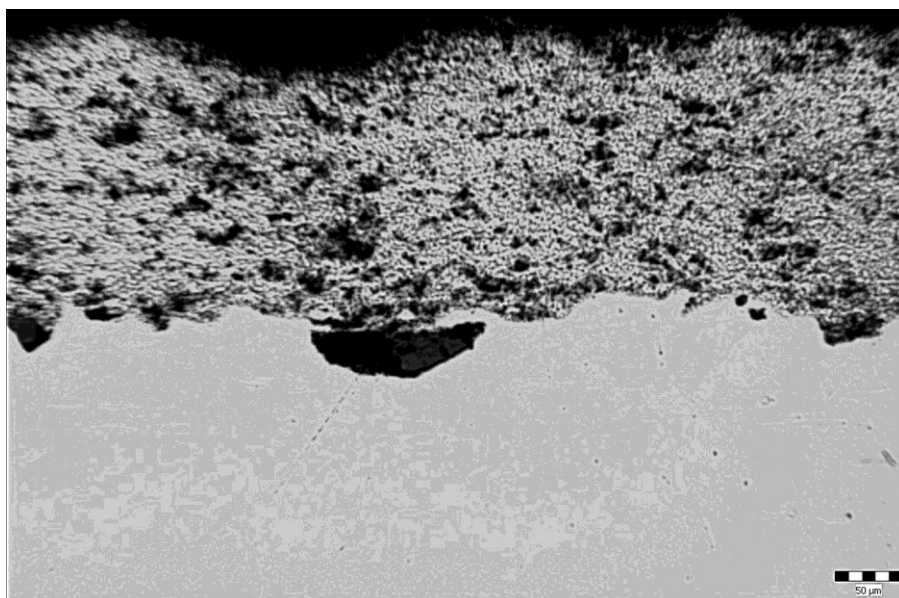
Na detailu jsou vidět póry. Ty vznikly při tvorbě povlaku nánosem jednotlivých kapek žárového nástřiku.

Obrázky (20, 21, 22 a 23) jsou fotky povrchů povlaků vzorků, které byly v lázni jeden měsíc.



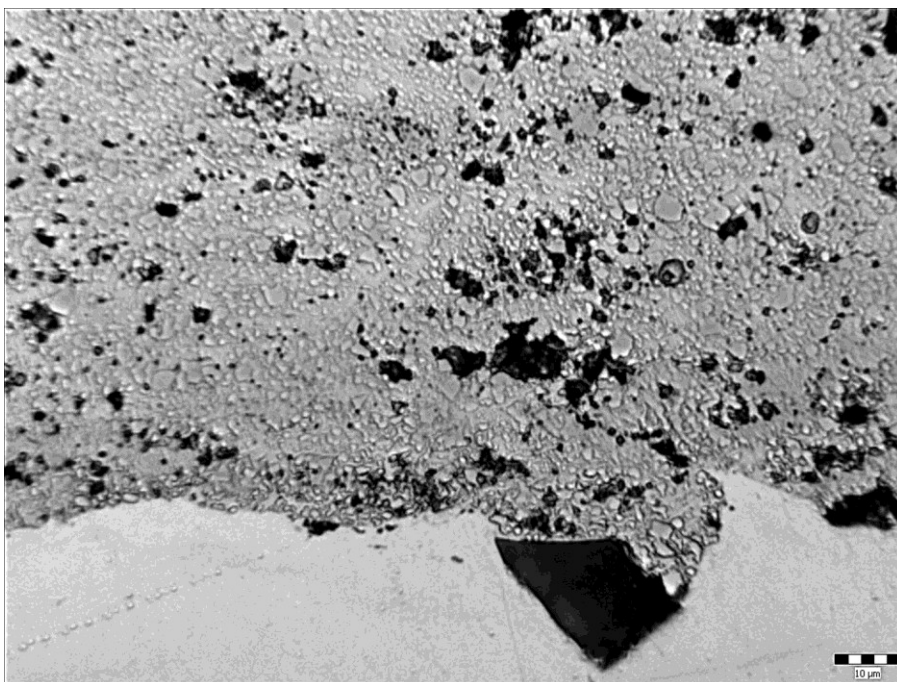
Obr. 20. Mikrostruktura, neleptáno a zvětšeno 100x.

Dokonalé přilnutí povlaku a základního materiálu. Soudržnost povlaku je dobrá.

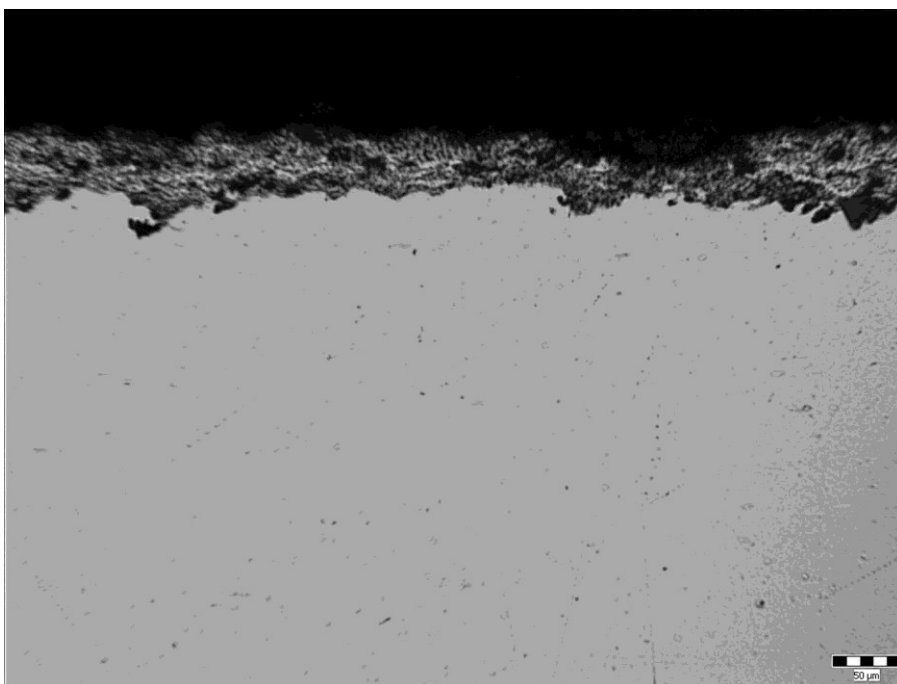


Obr. 21. Mikrostruktura, neleptáno a zvětšeno 100x.





Obr. 22. Mikrostruktura, nelepáno a zvětšeno 500x.



Obr. 23. Mikrostruktura, nelepáno a zvětšeno 100x.

### **Vzorek 3 (značení 1350):**

#### ***Materiál:***

WC – 86%    Co – 10%    Cr – 4%

#### ***Povlak vlastnosti:***

- Vysoká odolnost vůči všem mechanismům mechanického opotřebení

- Použití do 540 °C
- Překonává tvrdochrom v mechanických a korozních vlastnostech
- Tvrdost HV 1000, HRc 68
- Vyšší korozní odolnost než 80.71. a 80.73. pH > 4.

#### **Použití:**

- Letectví
- Kompresory
- Ventilátory
- Hydraulické válce
- Papírný rolls.

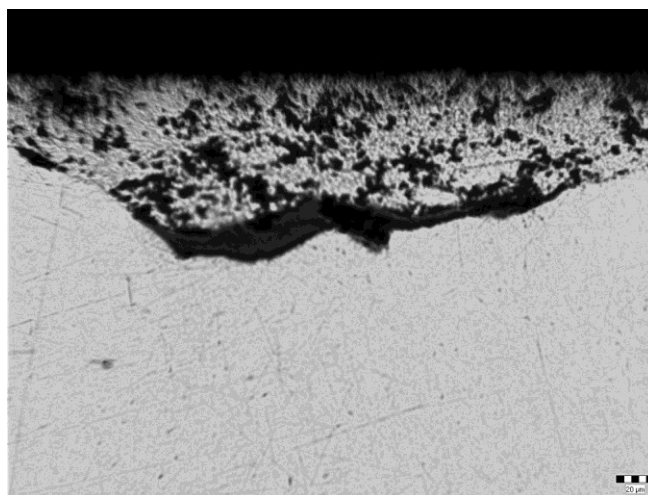
Na fotografiích můžeme zhlédnout různé vměsky, trhliny, praskliny a jiné vady. Trhliny na krajích vzorků nebude brán žádný zřetel. Tyto trhliny zde vznikly zatečením korozního media , který se při nástřiku dostal mezi tyto k sobě spojené vzorky. Praskliny, které jsou na rozhraní povlaku a základního materiálu jsou vzniklé buď špatným očištěním vzorku, nebo byl základní materiál nějak narušen (např. vnitřní vadou), anebo nedošlo ke správnému přilnutí povlaku na základní materiál.

Kvalita povlaku: vyhovující.

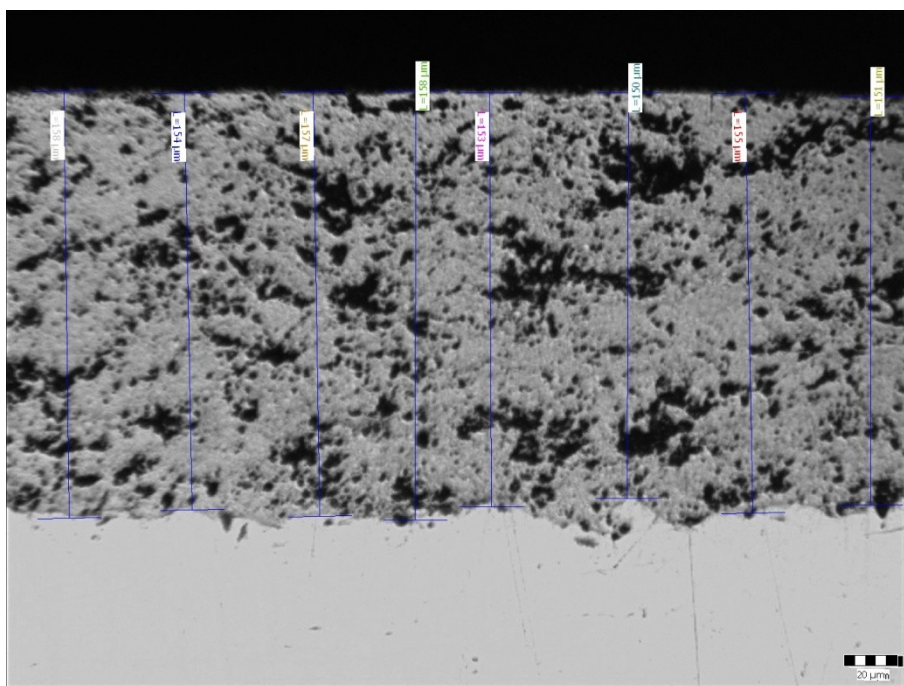
Typ objektu	Druh měření	Číslo měření	Hodnota	Jednotky	Popis	Statistiky		
Úsečka	Délka	1	154	μm		Veličina	Délka	
Úsečka	Délka	2	157	μm		Počet měření	8	
Úsečka	Délka	3	153	μm		Střední hodnota	154,5	μm
Úsečka	Délka	4	150	μm		Sm. odchylka	2,9	μm
Úsečka	Délka	5	155	μm				
Úsečka	Délka	6	151	μm				
Úsečka	Délka	7	158	μm				
Úsečka	Délka	8	158	μm				

Tabulka 12. Naměřené tloušťky povlaku (1350).

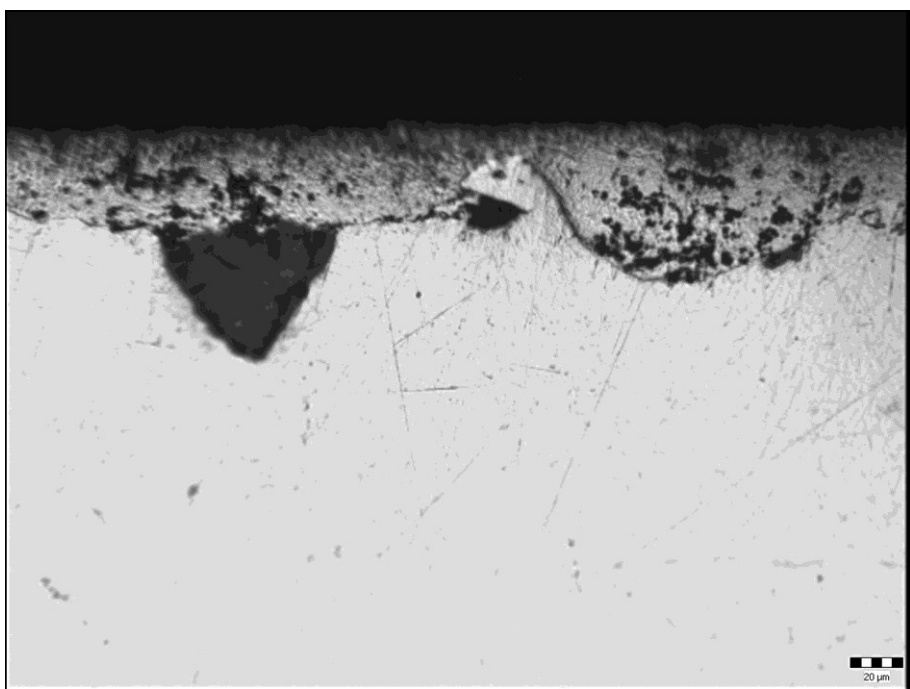
Obrázky (24, 25 a 26) jsou fotky povrchů povlaků vzorků, které byly v lázni 24 hodin.



Obr. 24. Mikrostruktura, neleptáno a zvětšeno 200x.

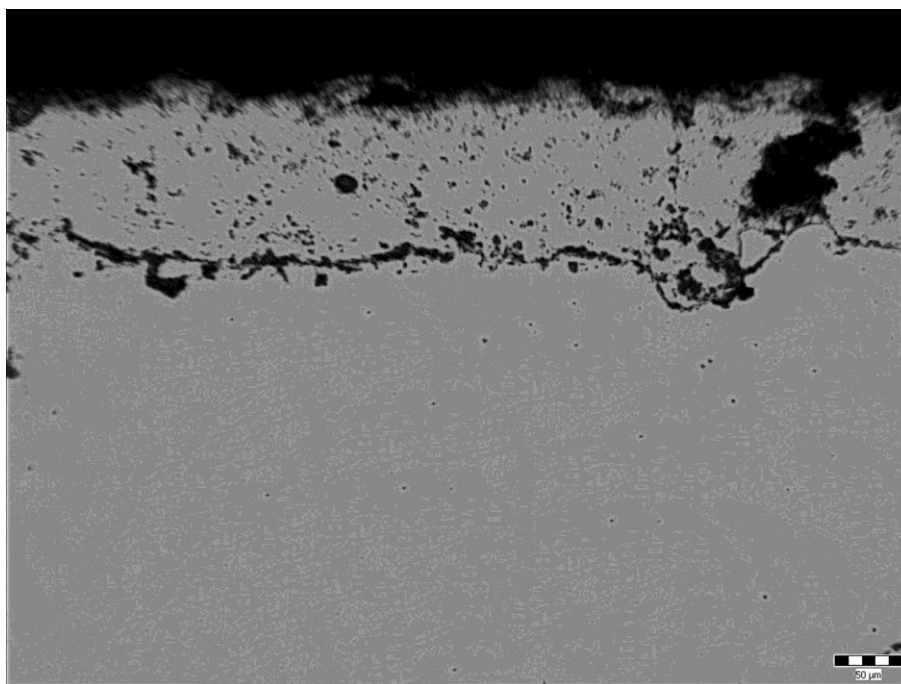


Obr. 25. Mikrostruktura, leptáno, změřené tloušťky povlaku a zvětšeno 200x.

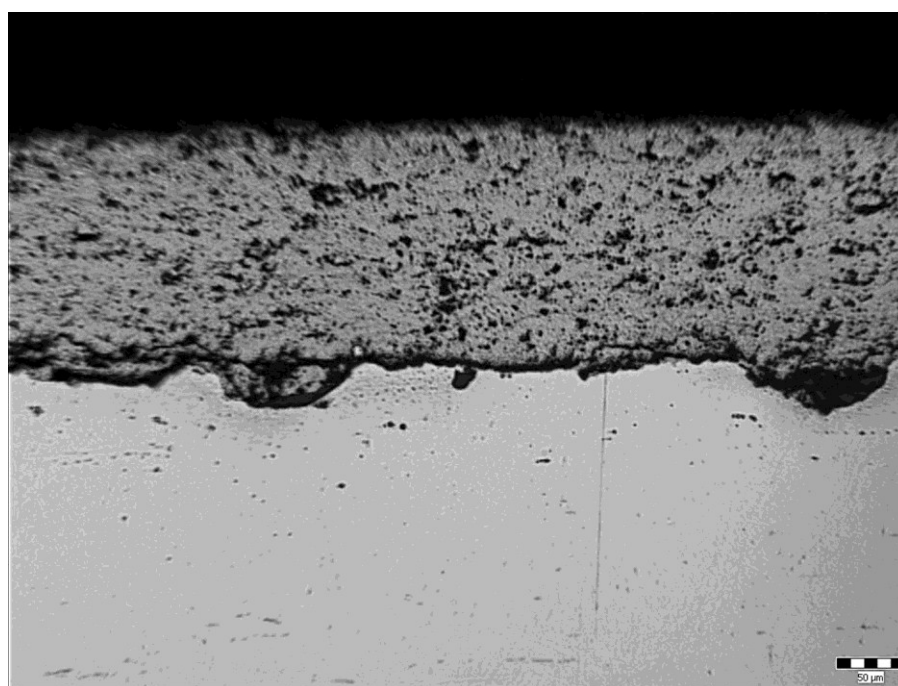


Obr. 26. Mikrostruktura, neleptáno a zvětšeno 200x.

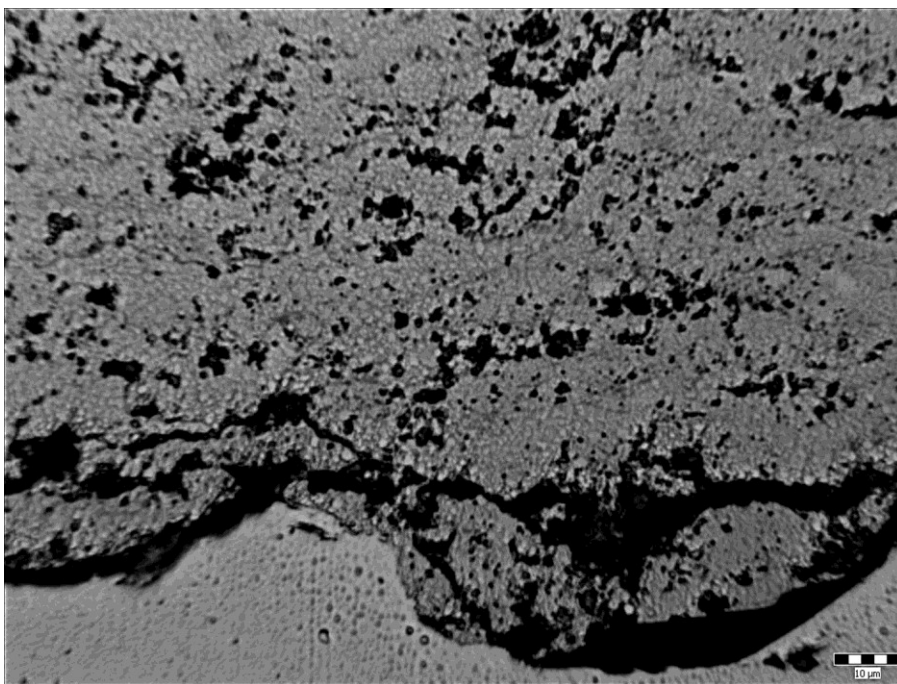
Obrázky (27, 28 a 29) jsou fotky povrchů povlaků vzorků, které byly v lázni jeden týden.



Obr. 27. Mikrostruktura, neleptáno a zvětšeno 100x.

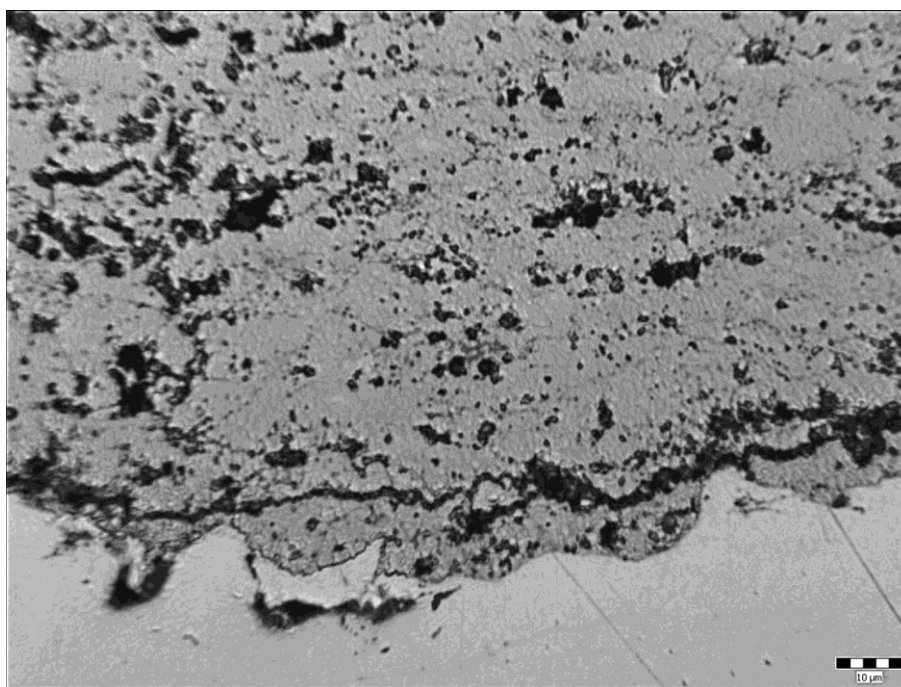


Obr. 28. Mikrostruktura, neleptáno a zvětšeno 100x.

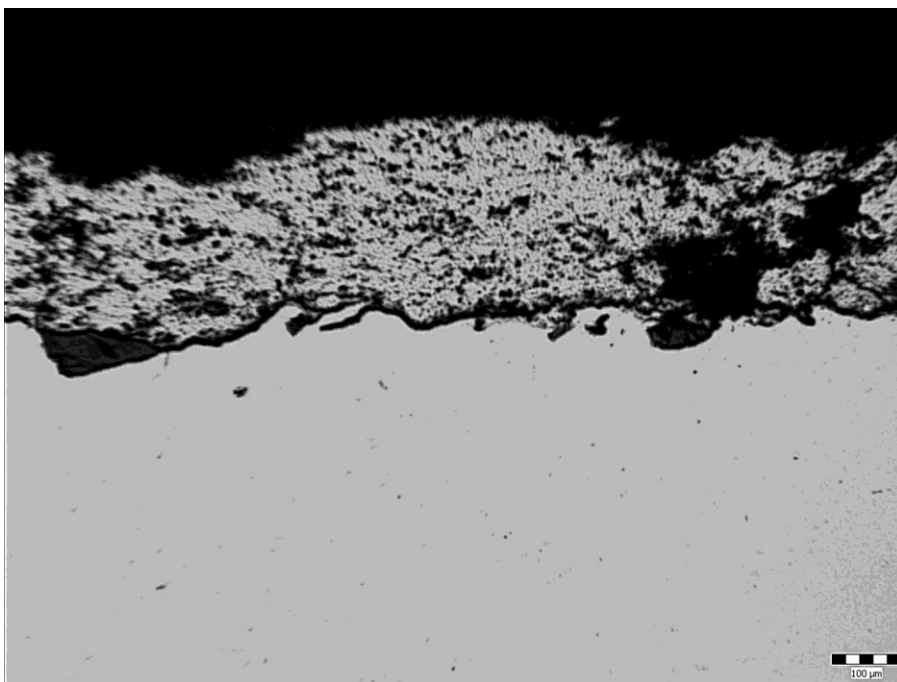


Obr. 29. Mikrostruktura, neleptáno a zvětšeno 500x.

Obrázky (30, 31 a 32) jsou fotky povrchů povlaků vzorků, které byly v lázni jeden měsíc.

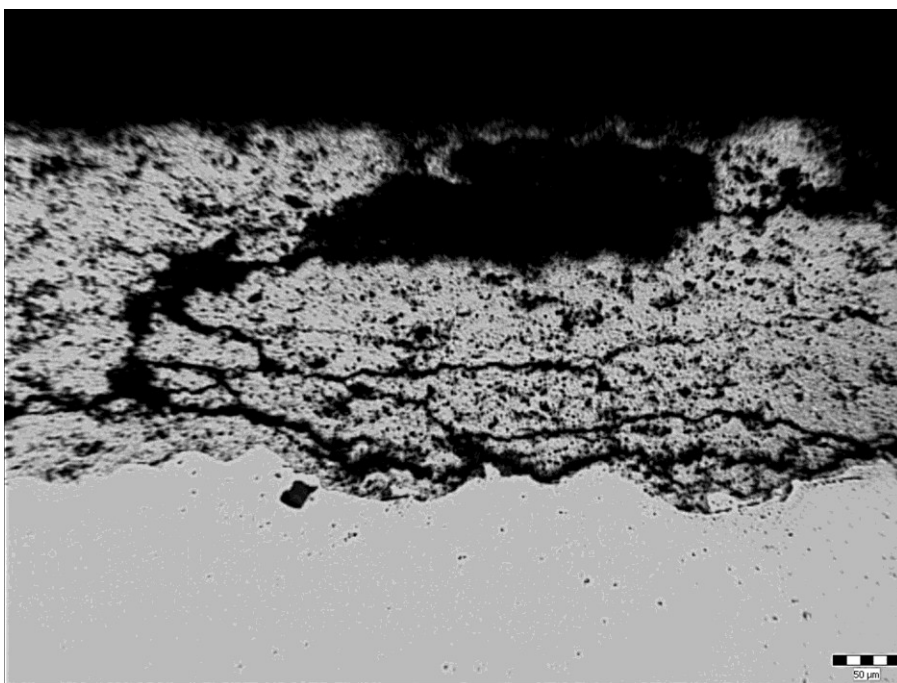


Obr. 30. Mikrostruktura, neleptáno a zvětšeno 500x.



Obr. 31. Mikrostruktura, neleptáno a zvětšeno 100x.

- Póry ve struktuře vznikly nástřikem kapek na sebe.
- Trhliny vznikly zatečením korozního media bokem kde nebyl nástřik.



Obr. 32. Mikrostruktura, neleptáno a zvětšeno 100x.



#### **4. Diskuze dosažených výsledků:**

Kvalita povlaku byla zařazena do tří tříd u prvního (1375) nevyhovující, a proto byl tento povlak vyřazen z experimentu, u druhého (1343) dobrá kvalita povlaku, tento povlak má kladné vlastností pro nástřik HVOF zde byla kvalita povlaku nejlepší a třetí povlak (1350) vyhovující, povlak má sice větší procento vnitřních vad, ale nerozpadá se a má obstojnou přilnavost.

Vzorky	Značení	Kvalita povlaku	Rozhodnutí
1	1375	Nevyhovující	Vyřazen
2	1343	Dobrá	Zařazen
3	1350	Vyhovující	Zařazen

Tabulka 4. Výsledné rozhodnutí o zařazení povlaku po provedení experimentu. Kvalita označení (dobrá) je nejkvalitnější povlak.

Vzorek 1 (povlak 1375) má špatnou přilnavost, velké procento pórovitosti v mikrostruktuře povlaku, na fotografiích byly shlednuty vnitřní vady trhlinky a povrch, který byl napaden korozí. Z těchto důvodů byl vzorek vyřazen a nebyl dále zkoumán. Vzorek prošel pouze jednou expozicí media a to po dobu 24 hodin.

Vzorek 2 (povlak 1343) velmi dobrá přilnavost, skoro žádné procento pórovitosti, povrch naprosto čistý po všech třech fázích uložení vzorku do kapalin. Povlak má dobrou kvalitu. Vzorky prošli všemi typy medií. Kvalita a mikrostruktura se během všech tří pokusů neměnila. Nevnikaly trhliny ani póry. Taktéž kvalita povrchu povlaku zůstala stejná. Malé trhlinky jsou vhodné k absorpci oleje. Tento povlak je vhodný, kde je třeba kluzných povlaků. Povlak má vnikající soudržnost.

Vzorek 3 (povlak 1350) malé procento pórovitosti, povrch vzorku vyhovující a pojivost materiálu je dobrá. Zařazen do skupiny vyhovující. Vzorek prošel všemi typy medií. Povlak po 24 hodinách a po jednom týdnu má stejnou mikrostrukturu a nevznikají žádné další trhliny ani póry. Po jednom měsíci v mediu vznikly na povlaku další póry a trhliny.

Trhliny vznikly na povlaku zatečením materiálu při nástřiku mezi upnuté vzorky. Póry, které jsou viditelné na fotografiích mezi povlakem a základním materiálem vznikly nezatečením materiálu. Tyto póry se odvíjejí od přípravy povrchu vzorků který, byl tryskán a tím na něm vznikly jámy. Do těch nástřik nezatekl.

Póry v mikrostruktuře vznikly nástřikem, jednotlivé kapky při dopadu na povrch materiálu jsou kladené přes sebe a každá kapka má svou strukturu (viz. obr. 33).

Po prozkoumání všech tří vzorků byl vybrán jako neideálnější vzorek číslo 2 (povlak 1343), který má složení materiálu (WC – 77%, Co – 17%, C – 4%, Fe – 1%, ostatní – 1 %). Tloušťka povlaku byla naměřena 0,150 µm.

## **5. Závěr:**

V teorii práce bylo probráno vše okolo technologií žárových nástřiků se zaměřením na HVOF nástřik. Přes technologii tvorby žárového nástřiku se přešlo na rozdělení daných metod žárových nástřiků (např.: žárový nástřik plamenem, nástřik elektrickým obloukem). Hlavní kapitola však byla žárový nástřik HVOF. Na tuto metodu se práce totiž soustředí. Ke tvorbě žárových povlaku je třeba přídavného materiálu a ten je buď ve formě prášků, nebo drátů. Tudíž v další kapitole byly popsány přídavné materiály. Jejich vlastnosti a charakteristika se vyhotovily do tabulek.

Do experimentu se zařadily tři přídavné materiály pro žárový nástřik metodou HVOF. Pomocí zařízení TAFA JP 5000 se provedly tři nástřiky na čela zhotovených vzorků. Vzorky byly vyhotoveny rozřezáním silnostěnné trubky na 10 mm nátrubky. Materiál základních vzorků je uhlíková ocel. Po zhotovení jednotlivých nástřiků se vložily vzorky do media a to po dobu 24 hodin, jednoho týdne a jednoho měsíce. Vzorky byly rozřezány a vyleštěny, pak se zhotovily fotografie žárových povlaků na mikroskopu. Na fotografiích se označily a popsaly vady. Ke každému přídavnému materiálu se přidaly jejich vlastnosti a použití.

Diskuse se zabývá jednotlivými povlaky. Jejím srovnáním mezi expozicemi uložení v mediu. A byla zhodnocena kvalita povlaku, kvalita povrchu povlaku, soudržnost struktury materiálu, přilnavost povlaku mezi základním materiálem vzorku a povlakem nástřiku. Vzorek s povlakem 1375 byl vyřazen z experimentu. Kvalita povrch povlaku u něj nesplnila požadovaná kritéria pro nástřik. Vzorek s povlakem 1350 byl pro tento experiment vyhovující. A povlak 1343 měl dobrou strukturu povlaku, dobrou soudržnost a dobrou kvalitu povrchu povlaku. Tento materiál povlaku byl vybrán jako nejlepší pro tento experiment.

Povrchová úprava metodou žárového nástřiku výrazně prodlužuje životnost takto povrchově upravených strojních součástí. To má příznivý vliv nejen na ekonomické hledisko, ale také například na ekologii. U hydraulických systémů vykazují povlaky vytvořené technologií žárového nástřiku lepší těsnost a tím se výrazně snižuje možnost úniku hydraulických kapalin do životního prostředí. Také možnost renovací strojních součástí metodou žárového nástřiku, které by díky svému poškození bylo nutno vyřadit, umožňuje lepší využívání přírodních zdrojů, na což je z dlouhodobého hlediska, díky stále rostoucímu rozvoji průmyslu ve světě, nutno brát zřetel.



## **Literatura**

- [1] Houdková Šimůnková, Š.: *Hodnocení mechanických vlastností žárových nástřiků* [Disertační práce], KMM FST ZČU, (2003)
- [2] Enžl, R.: *Vysokorychlostní nástřik povlaků na bázi karbidu wolframu*, [Disertační práce], KFY FAV ZČU, (2001)
- [3] BAJDA, Miloslav. Práškové stavované povlaky a jejich praktické využití. Svařák.cz : informační web aplikací a vývoje v oblastech žárového stříkání, svařování a navařování [online]. 2006 [cit. 2011-03-16]. Dostupný z WWW: <<http://www.svarak.cz/cz/plamenopraskove-stavovane-povlaky-ajejich-vyuziti-v-praxi.htm>>.
- [4] HOUDKOVÁ ŠIMŮNKOVÁ, Šárka, ENŽL, Radek, BLÁHOVA, Olga. Žárové nástřiky : moderní technologie povrchových úprav [online]. 2003 [cit. 2011-03-16]. Dostupný z WWW: <<http://www.kmm.zcu.cz//index.htm>>.
- [5] PŘEDSTAVENÍ SPOLEČNOSTI PLASMAMETAL : TECHNOLOGIE ŽÁROVÉHO stříkání [online]. 2002 , 11.3.2002 [cit. 2011-04-04]. Dostupný z WWW: <<http://www.plasmametal.cz/>>.
- [6] Super D-Gun™ Coating Process [online]. c2005 , 2005 [cit. 2011-04-05]. Text v angličtině. © Copyright 2005 Praxair S.T. Technology, Inc., All Rights Reserved. Dostupný z WWW: <[http://www.praxair.com/praxair.nsf/d63afe71c771b0d785256519006c5ea1/2471692e3b79f13485256ef600676b10/\\$FILE/Super%20Dgun%20Coating%20Process.pdf](http://www.praxair.com/praxair.nsf/d63afe71c771b0d785256519006c5ea1/2471692e3b79f13485256ef600676b10/$FILE/Super%20Dgun%20Coating%20Process.pdf)>.
- [7] BUREŠ, Jiří. ConVERTER : převody jednotek [online]. c2002 , 2004 [cit. 2008-04-24]. Dostupný z WWW: <<http://www.converter.cz>>. ISSN 1214-7591.

